



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ
ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

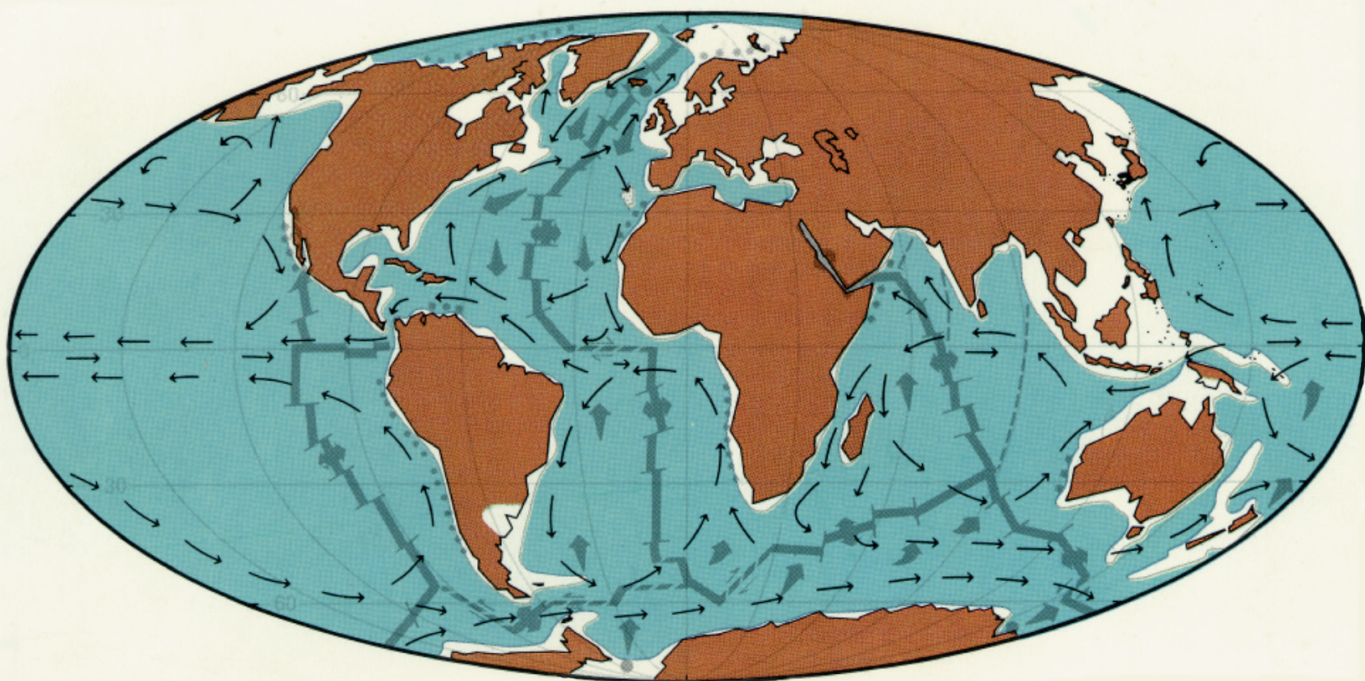


Материалы
XXVI
Международной
научной
конференции
(Школы)
по морской
геологии

Москва
2025

ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Том II



*РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН*

**ГЕОЛОГИЯ
МОРЕЙ И ОКЕАНОВ**

**Материалы XXVI Международной научной конференции
(Школы) по морской геологии**

Москва, 17–21 ноября 2025 г.

Том II

**GEOLOGY
OF SEAS AND OCEANS**

**Proceedings of XXVI International Conference on Marine
Geology**

Moscow, November 17–21, 2025

Volume II

Москва / Moscow
ИО РАН / IO RAS
2025

ББК 26.221
Г35
УДК 551.35

Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. – М.: ИО РАН, 2025. – 279 с.

В настоящем издании представлены доклады морских геологов, геофизиков, геохимиков и других специалистов на XXVI Международной научной конференции (Школе) по морской геологии, опубликованные в четырех томах.

В томе II рассмотрены проблемы палеоокеанологии, палеоэкологии, биостратиграфии, перекрестной корреляции отложений и изучения микро- и наночастиц, а также потоков вещества и энергии (атмо-, крио-, гидро-, лито- и седиментосферы).

ISBN 978-5-6051054-8-0

DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-8-0>

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Ответственный редактор к.г.-м.н. Н.В. Политова

Рецензенты

академик Л.И. Лобковский, д.г.н. Е.И.

Полякова, д.г.-м.н. А.Г. Матуль, к.г.-м.н. В.П.

Шевченко

Geology of seas and oceans: Proceedings of XXVI International Conference on Marine Geology. Vol. II. – Moscow: IO RAS, 2025. – 279 pp.

The reports of marine geologists, geophysicists, geochemists and other specialists of marine science at XXVI International Conference on Marine Geology in Moscow are published in four volumes.

Volume II includes reports devoted to the problems of paleoceanology, paleoecology, biostratigraphy, cross correlation of deposits and investigations of micro- and nanoparticles, and mass and energy fluxes (atmo-, cryo-, hydro-, litho- and sedimentospheres).

ISBN 978-5-6051054-8-0
ББК 26.221

© ИО РАН 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Палеоокеанология, палеоэкология, биостратиграфия, перекрестная корреляция морских и сухопутных отложений

<i>Артемова А.В., Цой И.Б.</i> Динамика природной обстановки Охотском море в позднелайстоцен-голоценовое время	16
<i>Баженов И.И., Василенко Ю.П., Горбаренко С.А.</i> Реконструкция изменчивости ледовых условий западной части Берингова моря (хребет Ширшова) в позднем ллайстоцене–голоцене по данным ледового разноса (IRD)	18
<i>Василенко Л.Н., Обрезкова М.С., Цой И.Б., Плетнёв С.П., Аннин В.К., Юрцева И.А., Василенко Ю.П., Гусев Е.А., Хмель Д.С.</i> Распределение кремнистых, карбонатных и агглютинированных микрофоссилий в поверхностных осадках Восточно-Сибирского моря и котловины Подводников (Северный Ледовитый океан)	21
<i>Вишневская В.С., Амон Э.О.</i> Эволюция радиоларий баженовского морского палеобассейна (поздняя юра – начало раннего мела)	26
<i>Гладенков А.Ю., Казанский А.Ю.</i> Опыт оценки возраста палеогеновых биостратиграфических уровней по диатомеям в разрезах Камчатки на основе данных по магнитостратиграфии	31
<i>Гладенков Ю.Б.</i> Структура четвертичной системы – почему идут споры	36
<i>Голованова О.В.</i> Специфические механизмы возникновения дефицита кислорода в прибрежной зоне современных и древних морей и океанов при субмаринной разгрузке подземных вод	41
<i>Дорохова Е.В.</i> Гранулометрические тренды в осадках контуритовых дрейфов северной долины трансформного разлома Чарли-Гиббс и прилегающего фланга Срединно-Атлантического хребта	46

<i>Захарова А.А., Овсепян Е.А.</i> Комплексы бентосных фораминифер как индикаторы изменений условий окружающей среды в голоцене в проливе Кембридж, Земля Франца-Иосифа	50
<i>Клювиткина Т.С., Новичкова Е.А., Козина Н.В., Матуль А.Г., Мохан Р., Тивари М.</i> Динамика природных условий на юго-западном шельфе Шпицбергена по данным микропалеонтологического анализа	55
<i>Кузьмина В.А., Артемова А.В.</i> Диатомовые комплексы позднего плейстоцена-голоцена с подводного хребта Ширшова (Берингово море) как индикаторы изменения палеосреды	60
<i>Кулешова Л.А., Овсепян Е.А.</i> Бентосные фораминиферы как индикаторы изменчивости глубоководных условий в юго-западной Атлантике (возвышенность Риу-Гранди) в интервале последних 300 тыс. лет	63
<i>Левитан М.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В.</i> Сопоставление геохимических особенностей плейстоценовых отложений Индийского, Атлантического и Тихого океанов	67
<i>Левицкий В.И., Левицкий И.В.</i> Палеорекострукции осадочных пород в метаморфических комплексах докембрия-фанерозоя Фенноскандинавского и Сибирского кратонов, Памира	72
<i>Ломакина У.С., Яковичина Е.В., Яковичин С.Ю., Бордунов С.И.</i> Реконструкция питающих провинций для отложений нижнего мела Северо-Западного Кавказа	77
<i>Лысенко Е.И., Ткач А.А., Ткач Н.Т., Росляков А.Г.</i> Диатомовые водоросли в колонке донных отложений Среднего Каспия	82
<i>Маленкина С.Ю.</i> Реконструкции палеогеографических обстановок формирования различных строматолитов Европейской части России	86
<i>Мельникова А.А., Агафонова Е.А., Новичкова Е.А., Козина Н.В.</i> Диатомовые водоросли в поверхностных осадках Гренландского моря как индикатор современных	91

климатических условий	
<i>Меренкова С.И., Карпова Е.В., Пузик А.Ю., Литвинский В.А., Шувалова Ю.В., Медведков А.А.</i> Литолого-геохимическая специфика и особенности генезиса терригенно-карбонатных пород нижнеэвенкийской подсвиты (средний кембрий, запад Сибирской платформы)	95
<i>Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Махотин М.С., Новихин А.Е., Митрофанова Н.О.</i> Выделение экологических групп фораминифер в поверхностных осадках моря Лаптевых	100
<i>Пахневич А.В.</i> Среδοобразующая роль брахиопод: анализ прошлого и прогноз будущего	103
<i>Пересыпкин Н.Д., Борисов Д.Г., Левченко О.В.</i> Литологическая характеристика четвертичных отложений в долине разлома Долдрамс (Центральная Атлантика)	106
<i>Перфилов П.В., Борисов Д.Г., Куликова Ж.М.</i> Устройство отбора аликвотных проб суспензии для лазерного дифракционного гранулометрического анализа морских донных осадков	110
<i>Рубан Д.А.</i> Палеогеографическое положение Сахрайской суши в Кавказском море на переходе от триаса к юре	114
<i>Рыбалко А.Е., Усов А.Н., Гусев Е.А., Востриков Н.Н., Костромина Н.А.</i> Четвертичные отложения Охотского моря: особенности выделения, картирования и стратиграфического расчленения	119
<i>Соколова Е.А.</i> Сравнение танатоценозов планктонных фораминифер, сформировавшихся на разных палеоглубинах Тихого океана в начале кампанского века	124
<i>Сорокин В.М., Росляков А.Г. Ахманов Г.Г., Замотина З.С., Старовойтов А.В.</i> Формирование неоплейстоценовых осадков на шельфах северных и южных морей России	129
<i>Сыромятников К.В., Левитан М.А., Габдуллин Р.Р.</i> Литолого-фацциальное районирование Курильской	131

котловины и северо-западной части Тихого океана на основе геохимических и гранулометрических данных с применением методов математической статистики <i>Шилова О.С., Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю., Луговой Н.Н., Романенко Ф.А.</i> Следы голоценовой трансгрессии в разрезах террас Терского берега Белого моря <i>Бубенищикова Н., Пономарева В., Портнягин М., Нюрнберг Д.</i> Тефростратиграфия позднеплейстоценовых отложений подводной горы Миннетонка Императорского хребта (Северная Пацифика)	136 141
--	----------------

Нано- и микрочастицы, потоки вещества и энергии (атмо-, крио-, гидро-, лито-, седиментосферы)

<i>Агафонова Е.А., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н., Кудрявцева Е.А., Кравчишина М.Д.</i> Анализ распределения инвазивных видов диатомовых водорослей в осадочном веществе Лофотенской котловины <i>Баренбаум А.А., Шиловский А.П.</i> О взаимодействии макро- и микропроцессов в геологии <i>Василевич М.И., Василевич Р.С., Семенова Н.А.</i> Особенности химического состава атмосферных осадков и воздушных переносов на территории заповедника «Ненецкий» <i>Виноградова А.А., Котова Е.И., Лохов А.С.</i> Высота слоя перемешивания в нижней тропосфере над морями Российской Арктики <i>Вологина Е.Г., Штурм М., Буднев Н.М.</i> Вертикальные потоки осадочных частиц в Южной котловине озера Байкал с 2020 по 2021 гг. <i>Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Талпа Б.В., Попов Ю.В., Денисов В.И.</i> Вклад оловои взвеси в удельный поток осаждающегося взвешенного вещества на дно малых озер юга европейской части России <i>Губанова Д.П., Котова Е.И., Стародымова Д.П., Зметная М.И.</i> Влияние атмосферной пыли на	147 152 156 161 166 170 175
--	---

экосистемы суши и океана: экспериментальные данные о дальнем переносе аридного аэрозоля в западный сектор Российской Арктики	
<i>Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Долгая А.А.</i> Вынос растворенного вещества рекой Камчатка в Тихий океан (п-ов Камчатка)	181
<i>Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Котенко Т.А., Долгая А.А.</i> Вынос Cl и S с речным стоком и оценка химической эрозии о. Парамушир (Курильские острова)	186
<i>Килесо А.В., Гриценко В.А.</i> Короткоживущий адвективно-струйный механизм кросс-склонового переноса взвеси в прибрежной зоне моря у берегов Калининградской полуострова	191
<i>Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Дара О.М., Амбросимов А.К., Коченкова А.И., Булохов А.В., Иванов В.В.</i> Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в ноябре 2023 г.	196
<i>Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Амбросимов А.К., Булохов А.В., Иванов В.В.</i> Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в августе 2024 г.	201
<i>Ковалев Г.А., Амбросимов А.К.</i> О проблеме оценки переноса вод по проливам Баренцева моря	206
<i>Колтовская Е.В., Борисенко Г.В.</i> Концентрации взвешенного вещества в заливе Шелихова и Пенжинской губе Охотского моря в летний период	211
<i>Коробченкова К.Д., Ульянова М.О.</i> Распределение взвешенного вещества в устьевой области реки Преголи (Балтийское море)	216
<i>Котова Е.И., Стародымова Д.П., Лохов А.С., Нецветаева О.П., Титова К.В.</i> Исследования взаимосвязи химического состава снежного покрова и поверхностных вод в эстуариях рек юго-восточной части Баренцева моря	221
<i>Митяев М.В., Герасимова М.В.</i> Современная литодинамика в салме Гавриловских островов и губе	226

Подпахта Баренцева моря	
<i>Митяев М.В., Герасимова М.В.</i> Влияние атмосферных осадков на материковый сток с Мурманского побережья	231
<i>Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Малов Г.И., Малов В.И.</i> Содержание и источники поступления элементов потенциальных поллютантов в донных отложениях лимносистем Барабинской низменности (юг Западной Сибири)	236
<i>Орешкин В.Н., Цизин Г.И.</i> Развитие прямого электротермического атомно-абсорбционного анализа порошковых образцов морских и речных взвесей, концентратов вод, донных осадков	241
<i>Савенко А.В., Савенко В.С.</i> Иммобилизация фтора из морской воды при гальмиролизе магматических пород	246
<i>Савенко А.В., Савенко В.С.</i> Иммобилизация фтора из морской воды карбонатными минералами	250
<i>Сивков В.В., Пономаренко Е.П., Муратова А.А., Кречик В.А.</i> Хемогенные нефелоидные слои в юго-восточной части Балтийского моря	254
<i>Скроб П.В., Алексеева Т.Н., Медведков А.А.</i> Гранулометрический состав поверхностных отложений Западного Аралкума: геоэкологический анализ	260
<i>Тармёнок Е.О., Таловская А.В.</i> Геохимическая характеристика снегового покрова в районе расположения глиноземного производства	265
<i>Шевченко В.П.</i> Тридцать пять лет исследований влияния рассеянного осадочного вещества атмосферы на условия среды и морское осадконакопление в Арктике	270
<i>Шишкина А.Д., Новигатский А.Н., Смирнов И.А., Терновой Д.А., Калашикова Я.И., Саввичев А.С.</i> Состав криозоля поверхности Антарктического ледяного щита оазиса Ширмахера, ст. Новолазаревская	274

CONTENTS

Paleoceanology, paleoecology, biostratigraphy, cross correlation of marine and land deposits	
<i>Artemova A.V., Tsoi I.B.</i> Dynamics of the paleoenvironment in the Sea of Okhotsk during the Late Pleistocene–Holocene	16
<i>Bazhenov I.I., Vasilenko YU.P., Gorbarenko S.A.</i> Reconstruction of ice conditions variability in the western Bering Sea (Shirshov Ridge) during the Late Pleistocene–Holocene based on ice-rafted debris (IRD) data	18
<i>Vasilenko L.N., Obrezkova M.S., Tsoy I.B., Pletnev S.P., Annin V.K., Yurtseva I.A., Vasilenko Yu.P., Gusev E.A., Khmel D.S.</i> Distribution of siliceous, calcareous, and agglutinated microfossils in the surface sediments of the East Siberian Sea and Podvodnikov Basin (Arctic Ocean)	21
<i>Vishnevskaya V.S., Amon E.O.</i> Evolution of the radiolarians of the bazhenov marine paleobasin (late Jurassic – early Cretaceous)	26
<i>Gladenkov A.Yu., Kazansky A.Yu.</i> Experience of age estimates of diatom biostratigraphic levels in Kamchatka sections based on magnetostratigraphic data	31
<i>Gladenkov A.Yu.</i> Structure of the quaternary system – why there is dispute	36
<i>Golovanova O.V.</i> Specific mechanisms of coastal hypoxia phenomenon in modern and ancient seas and oceans during submarine groundwater discharge	41
<i>Dorokhova E.V.</i> Grain size trends in sediments of contourite drifts of the northern valley of the Charlie-Gibbs Fracture Zone and the adjacent Mid-Atlantic Ridge flank	46
<i>Zakharova A.A., Ovsepyan E.A.</i> Benthic foraminiferal assemblages as indicators of environmental changes during the Holocene, Cambridge Strait, Franz Josef Land	50
<i>Klyuvitkina T.S., Novichkova E.A., Kozina N.V., Matul A.G., Mohan R., Tiwari M.</i> Changes of environmental conditions on the southwestern shelf of Spitsbergen based on micropaleontological analysis	55
<i>Kuzmina V.A., Artemova A.V.</i> Late Pleistocene-Holocene	60

diatom assemblages from the Shirshov Ridge (Bering Sea) as indicators of paleoenvironmental change	
<i>Kuleshova L.A., Ovsepyan E.A.</i> Benthic Foraminiferal Evidence for Variability of Deep-Water Conditions in the Southwestern Atlantic (Rio Grande Rise) during the Last 300 kyr	63
<i>Levitan M.A., Domaratskaya L.G., Koltsova A.V., Syromyatnikov K.V.</i> Comparison of geochemical peculiarities of Pleistocene sediments from the Indian, Atlantic and Pacific oceans	67
<i>Levitskiy V.I., Levitskiy I.V.</i> Paleoreconstructions of sedimentary rocks in Precambrian-Phanerozoic metamorphic complexes of the Fennoscandian and Siberian cratons, Pamirs	72
<i>Lomakina U.S., Yakovishina E.V., Yakovishin S.Yu., Bordunov S.I.</i> Reconstruction of the sources provinces for the Lower Cretaceous deposits of the North-Western Caucasus	77
<i>Lysenko E.I., Tkach A.A., Tkach N.T., Roslyakov A.G.</i> Diatoms in the sediment core from the Middle Caspian	82
<i>Malenkina S.Y.</i> Paleogeographic environment reconstructions of the various stromatolites formation in the European part of Russia	86
<i>Melnikova A.A., Agafonova E.A., Novichkova E.A., Kozina N.V.</i> Diatom assemblages in the surface sediments of the Greenland Sea as indicators of modern climatic conditions	91
<i>Merenkova S.I., Karpova E.V., Puzik A.Yu., Litvinsky V.A., Shuvalova Yu.V., Medvedkov A.A.</i> Lithological and geochemical specificity and genesis features of terrigenous-carbonate rocks in the Lower Evenki subformation (Middle Cambrian, Siberian Platform)	95
<i>Ovsepyan Ya.S., Taldenkova E.E., Makhotin M.S., Novikhin A.E., Mitrofanova N.O.</i> Mechanisms of sedimentation in the northeastern part of the East Siberian Sea based on grain-size data	100
<i>Pakhnevich A.V.</i> The habitat-forming role of brachiopods: analysis of the past and forecast of the future	103
<i>Peresypkin N.D., Borisov D.G., Levchenko O.V.</i> Lithological	106

characteristics of Quaternary sediments in the Doldrums Fracture Zone valley (Central Atlantic)	
<i>Perfilov P.V., Borisov D.G., Kulikova Z.M.</i> An aliquot subsampling device for laser diffraction grain-size analysis of marine sediments	110
<i>Ruban D.A.</i> Paleogeographical position of the Sakhray land in the Caucasian Sea at the Triassic–Jurassic transition	114
<i>Rybalko A.E., Usov A.N., Gusev E.A., Vostrikov N.N., Kostromina N.A.</i> Quaternary deposits of the Okhotsk Sea: features of identification, mapping and stratigraphic division	119
<i>Sokolova E.A.</i> Comparison of thanatocenoses of planktonic foraminifera formed at different paleodepths of the Pacific Ocean at the beginning of the Campanian Age	124
<i>Sorokin V.M., Roslyakov A.G., Akhmanov G.G., Zamotina Z.S., Starovoytov A.V.</i> Formation of Neopleistocene sediments on the shelves of the northern and southern seas of Russia	129
<i>Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Gabdullin R.R.</i> Lithologic-facial zoning of the Kuril Basin and the Northwest Pacific Ocean on the basis of geochemical and granulometric data with application of mathematical statistics methods	131
<i>Shilova O.S., Zaretskaya N.E., Repkina T.Yu., Lugovoy N.N., Romanenko F.A.</i> Traces of the Holocene transgression in the sedimentary sequences of the terraces of the Tersky coast, White Sea	136
<i>Bubenshchikova N., Ponomareva V., Portnyagin M., Nürnberg D.</i> Tephrostratigraphy of Late Pleistocene sediments of Minnetonka Seamount of Emperor Seamount Chain (North Pacific)	141

**Micro- and nanoparticles, and mass and energy fluxes
(atmo-, cryo, hydro-, litho-, sedimentospheres)**

<i>Agafonova E.A., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N., Kudryavtseva E.A., Kravchishina M.D.</i> Analysis of invasive diatoms' distribution in sinking material of the Lofoten basin	147
<i>Barenbaum A.A. Shilovsky A.P.</i> On the interaction of macro-	152

and microprocesses in geology	
<i>Vasilevich M.I., Vasilevich R.S., Semyonova N.A.</i> Features of the chemical composition of precipitation and air transfers in the “Nenetsky” reserve	156
<i>Vinogradova A.A., Kotova E.I., Lokhov A.S.</i> The mixing layer height in the lower troposphere above the Russian Arctic Seas	161
<i>Vologina E.G., Sturm M., Budnev N.M.</i> Vertical fluxes of sediment particles in the Southern Basin of Lake Baikal from 2020 to 2021	166
<i>Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Popov Yu.V., Denisov V.I.</i> Contribution of Aeolian suspension to the specific flow of sedimented suspended matter to the bottom of small lakes in the south of the European part of Russia	170
<i>Gubanova D.P., Kotova E.I., Starodymova D.P., Zmetnaya M.I.</i> Influence of atmospheric dust on ecosystems of land and ocean: experimental data on long-range transport of arid aerosol to the Western sector of the Russian Arctic	175
<i>Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Dolgaia A.A.</i> Flux of the dissolved components by the Kamchatka River into the Pacific Ocean (Kamchatka Peninsula)	181
<i>Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Kotenko T.A., Dolgaia A.A.</i> Flux Cl and S with river runoff and assessment of chemical erosion about. Paramushir (Kuril Islands)	186
<i>Kileso A.V., Gritsenko V.A.</i> Short-term advective-jet mechanism of cross-slope transport of suspended matter in the coastal zone of the sea off the shore of the Kaliningrad Peninsula	191
<i>Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Novigatsky A.N., Dara O.M., Ambrosimov A.K., Kochenkova A.I., Bulokhov A.V., Ivanov V.V.</i> Vertical particle fluxes in the Barents Sea on November, 2023	196
<i>Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V., Novigatsky A.N., Ambrosimov A.K., Bulokhov A.V., Ivanov V.V.</i> Vertical particle fluxes in the Barents Sea on August, 2024	201

<i>Kovalev G.A., Ambrosimov A.K.</i> On the Problem of Assessing Water Transport through the Straits of the Barents Sea	206
<i>Koltovskaia E.V., Borisenko G.V.</i> Concentrations of suspended matter in the Shelikhov Bay and Penzhinskaya Bay of the Sea of Okhotsk in summer	211
<i>Korobchenkova K.D., Ulyanova M.O.</i> Distribution of suspended matter in the mouth area of the Pregolya River (Baltic Sea)	216
<i>Kotova E.I., Starodymova D.P., Lokhov A.S., Netsvetaeva O.P., Titova K.V.</i> Research on the relationship between the chemical composition of snow cover and surface waters in the river estuaries of the southeastern part of the Barents Sea	221
<i>Mityaev M.V., Gerasimova M.V.</i> Modern lithodynamics in the Salma of the Gavrilovsky Islands and the Podpakhta Bay of the Barents Sea	226
<i>Mityaev M.V., Gerasimova M.V.</i> The influence of atmospheric precipitation on continental runoff from the Murmansk coast	231
<i>Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Malov G.I., Malov V.I.</i> The content and sources of potential pollutants in the bottom sediments of the limnosystems in the Baraba Lowland (southern Western Siberia)	236
<i>Oreshkin V.N., Tsisin G.I.</i> Development of direct electrothermal atomic absorption analysis of powdered samples of sea and suspended matter, water concentrates, and bottom sediments	241
<i>Savenko A.V., Savenko V.S.</i> Immobilization of fluorine from seawater during halmyrolysis of igneous rocks	246
<i>Savenko A.V., Savenko V.S.</i> Immobilization of fluorine from seawater by carbonate minerals	250
<i>Sivkov V.V., Ponomarenko E.P., Muratova A.A., Krechik V.A.</i> The chemogenic nepheloid layers in the southeastern Baltic Sea	254
<i>Skrob P.V., Alekseeva T.N., Medvedkov A.A.</i> Granulometric composition of surface sediments of the Western Aralkum:	260

geoecological analysis	
<i>Tarmyonok E.O., Talovskaya A.V.</i> Geochemical characteristics of snow cover in the alumina refinery area	265
<i>Shevchenko V.P.</i> Thirty-five years of studies of the influence of atmospheric dispersed sedimentary matter on environmental conditions and marine sedimentation in the Arctic	270
<i>Shishkina A.D., Novigatsky A.N., Smirnov I.A., Ternovoy D.A., Kalashnikova Y.I., Savvichev A.S.</i> Composition of cryosol from the surface of the Antarctic ice sheet at the Schirmacher Oasis, Novolazarevskaya station	274

***ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ,
ПАЛЕОЭКОЛОГИЯ,
БИОСТРАТИГРАФИЯ,
ПЕРЕКРЕСТНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ
МОРСКИХ И СУХОПУТНЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ***

***PALEOOCEANOLOGY,
PALEOECOLOGY,
BIOSTRATIGRAPHY, CROSS
CORRELATION OF MARINE AND
LAND DEPOSITS***

Артемова А.В., Цой И.Б.

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, e-mail: artemova@poi.dvo.ru)

**Динамика природной обстановки Охотском море в
позднеплейстоцен-голоценовое время.**

Artemova A.V., Tsoi I.B.

(V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok)

**Dynamics of the paleoenvironment in the Sea of Okhotsk
during the Late Pleistocene–Holocene**

Ключевые слова: диатомовые водоросли, палеореконструкции, плейстоцен, голоцен, Охотское море, морские льды, палеопродуктивность.

Для реконструкции истории ледовых условий, продуктивности диатомовых водорослей и интрузии тихоокеанских вод в Охотское море за последние 130 тыс. лет был использован керн морских осадков LV76-9-1.

Воды Тихого океана, являющиеся основным источником тепла, оказывают значительное влияние на продолжительность ледового сезона и циркуляцию вод в Охотском море. Однако долговременная история проникновения тихоокеанских водных масс и изменений ледовой обстановки в Охотском море остается недостаточно изученной, что затрудняет построение точных прогнозов ее будущих изменений. В данном исследовании данные диатомового анализа керна из прикамчатского района Охотского моря (LV76-9-1) сопоставлены с результатами изучения кернов из центральной части моря (LV 28-41-5) и западной части у склона о. Сахалин (GE 99-10-3).

Охотское море играет ключевую роль в климатической системе Северного полушария благодаря своему уникальному гидрологическому режиму и интенсивному сезонному ледообразованию. В настоящей работе представлены результаты реконструкции механизмов тысячелетней изменчивости климата и динамики морского ледового покрова в течение последнего ледникового цикла (130–15 тыс. л.н.) и голоцена, основанные на анализе количественных и качественных изменений диатомовых комплексов.

Работа выполнена в рамках госзаданий ТОИ ДВО РАН (№ 124022100084-8 и 124072000018-9).

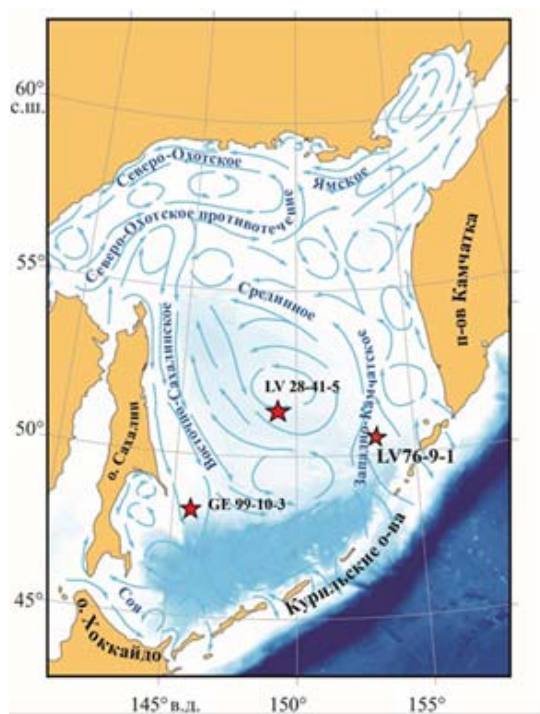


Рисунок. Карта местоположения изученных кернов и поверхностных течений Охотского моря.

Sediment core LV76-9-1 was used to reconstruct the history of sea-ice formation, diatom productivity, and the inflow of Pacific waters into the Sea of Okhotsk over the last 130 thousand years.

Баженов И.И., Василенко Ю.П., Горбаренко С.А.

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: bazhenov.ii@poi.dvo.ru)

Реконструкция изменчивости ледовых условий западной части Берингова моря (хребет Ширшова) в позднем плейстоцене–голоцене по данным ледового разноса (IRD).

Bazhenov I.I., Vasilenko YU.P., Gorbarenko S.A.

(V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok)

Reconstruction of ice conditions variability in the western Bering Sea (Shirshov Ridge) during the Late Pleistocene–Holocene based on ice-rafted debris (IRD) data.

Ключевые слова: материал ледового разноса (IRD), палеоклимат, поздний плейстоцен, голоцен, Берингово море, возрастная модель, Bacon, Байесовская статистика, Сибирский антициклон, скорость осадконакопления.

Изучение материала ледового разноса (IRD) в донных отложениях является надежным инструментом для реконструкции палеоклимата и ледовых условий прошлого. В работе представлены результаты исследования керна LV76-26-2, отобранного на хребте Ширшова в западной части Берингова моря (56°58.9' с.ш., 170°39.5' в.д., глубина 1165 м, длина керна 807 см). Положение станции показано на рисунке.

Одним из ключевых элементов исследования являлось построение высоконадежной возрастной модели керна, которая позволила точно привязать изменения IRD к временной шкале. Модель была построена в программной среде R 4.4.3 с использованием пакета Bacon 3.4.2, который применяет байесовский статистический подход (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) для учета неопределенностей в датировках и изменчивости скорости осадконакопления [1]. Модель основана на анализе комплекса различных данных: цветность (b^*), отражающая содержание диатомей; концентрация хлорина, как индикатор первичной продуктивности; влажность и плотность осадка; вариации магнитной восприимчивости и палеомагнитные экскурсы (событие Mono Lake, Laschamp и Blake); изотопный анализ кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и углерода ($\delta^{13}\text{C}$). Благодаря этому были выделены границы морских изотопных стадий (MIS) и ключевых интерстадиалов. Визуализация результатов работы Bacon (графики «MCMC», скорости осадконакопления «Acc. Rate», «Memory» и итоговой возрастной модели) подтвердила корректность и надежность построенной модели, показав хорошую сходимость итераций.

Нами было отобрано и проанализировано 403 образца на содержание материала ледового разноса (IRD) [частиц/г]. Для анализа использовали

фракцию 0.15–2 мм. Количественный учет терригенных зерен проводили с помощью бинокулярного микроскопа. В каждой пробе подсчитывали не менее 300 частиц терригенного происхождения. Биогенные и вулканогенные компоненты при подсчете исключались. Далее на основе возрастной модели рассчитаны скорости осадконакопления, которые значительно варьировали между стадиями: от минимума в MIS 1 (1.64 см/тыс. лет) до максимума в MIS 3 (8.18 см/тыс. лет). Что также позволило рассчитать скорость аккумуляции материала ледового разноса (IRDAR) [частиц/ (см² × тыс. лет)], которая является более надежным индикатором интенсивности ледового разноса, так как нивелирует влияние изменчивости седиментации.

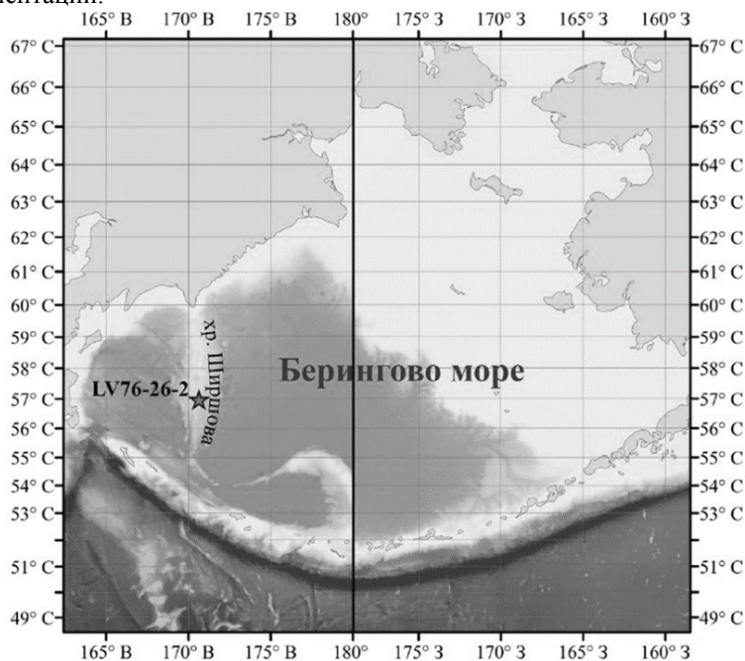


Рисунок. Расположение станции Lv76-26-2 на хребте Ширшова.

Полученные данные выявили четкую динамику ледовых условий за последние ~190 тыс. лет:

MIS 6 характеризовалась максимальными значениями содержания IRD и экстремальной IRDAR, что связано с интенсивным оледенением. MIS 5 показала высокую изменчивость: максимумы в подстадиях 5.1 и 5.5 и минимумы в 5.2–5.4. MIS 3 выделяется резкими пиками содержания IRD, синхронными с периодами похолодания (стадиалами). MIS 2, несмотря на суровые ледовые условия [2, 3], отличается умеренными значениями IRD и IRDAR, что, вероятно, связано с формированием устойчивого ледяного

покрова, ограничивавшего таяние льда и поступление обломочного материала. MIS 1 (голоцен) демонстрирует минимальные значения IRD и IRDAR, соответствующие мягким современным ледовым условиям.

Сравнение с керном LV28-44-4 из Охотского моря выявило схожие закономерности изменчивости IRD [2, 3]. Установлено, что ключевую роль в усилении ледового разноса на протяжении позднего плейстоцена-голоцена играло усиление и ослабление Сибирского антициклона/Алеутского минимума и изменения положения их центров. Их активизация приводила к смене доминирования ветров, что усиливало или ослабляло вынос припайных льдов в район исследования, что надежно фиксируется пиками IRD.

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№ 124022100084-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // *Bayesian Analysis*. 2011. V. 6. № 3. P. 457–474.
2. Vasilenko Yu.P., Gorbarenko S.A., Artemova A.V. et al. Orbital-scale changes of sea ice conditions of Sea of Okhotsk during the last glaciation and the Holocene (MIS 4–MIS 1) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2019. V. 533. P. 109284.
3. Vasilenko Yu.P., Gorbarenko S.A., Bosin A.A. et al. Millennial mode of variability of sea ice conditions in the Okhotsk Sea during the last glaciation (MIS 4–MIS 2) // *Quaternary International*. 2017. V. 459. P. 187–200.

The study of ice-rafted debris (IRD) in bottom sediments is a powerful tool for reconstructing paleoclimate and past ice conditions. This paper presents the results of a study of core LV76-26-2, retrieved from the Shirshov Ridge in the western Bering Sea (56°58.9' N, 170°39.5' E, water depth 1165 m, core length 807 cm). The station location is shown in Figure 1.

**Василенко Л.Н.¹, Обрезкова М.С.¹, Цой, И.Б.¹,
Плетнев С.П.¹, Аннин В.К.¹, Юрцева И.А.¹,
Василенко Ю.П.¹, Гусев Е.А.², Хмель Д.С.¹**

(¹Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: lidia@poi.dvo.ru; ²Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург)

**Распределение кремнистых, карбонатных и
агглютированных микрофоссилий в поверхностных
осадках Восточно-Сибирского моря и котловины
Подводников (Северный Ледовитый океан)**

**Vasilenko L.N.¹, Obrezkova M.S.¹, Tsoy I.B.¹, Pletnev S.P.¹,
Annin V.K.¹, Yurtseva I.A.¹, Vasilenko Yu.P.¹, Gusev E.A.²,
Khmel D.S.¹**

(¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok;

²Academician I.S. Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, Saint-Petersburg)

**Distribution of siliceous, calcareous, and agglutinated
microfossils in the surface sediments of the East Siberian Sea
and Podvodnikov Basin (Arctic Ocean)**

Ключевые слова: диатомей, фораминиферы, радиолярии, тинтинниды, папулиферы, Арктика, Восточно-Сибирское море, котловина Подводников.

В поверхностных осадках Восточно-Сибирского моря и юго-запада котловины Подводников изучены диатомовые водоросли, радиолярии, бентосные и планктонные фораминиферы, инфузории-тинтинниды и, вероятно, их цисты – папулиферы. Особенности распределения этих микроорганизмов в осадках позволили выделить их комплексы, отражающие различные условия среды.

Изучение структуры современных сообществ микроорганизмов в арктических морях позволяет на основе анализа современных процессов реконструировать параметры природной среды прошлых эпох, такие как продуктивность вод, температура, соленость, течения, а также влияние ледообразования и речного стока [1–3 и др.]. В настоящей работе проведено исследование четырех групп микроорганизмов (диатомовые водоросли, радиолярии, фораминиферы, тинтинниды и возможно их цисты – папулиферы) в поверхностных осадках Восточно-Сибирского моря (ВСМ) и юго-западного склона котловины Подводников (КП). Основная проблема при изучении микрофоссилий в данном регионе заключается в их крайне низкой численности и не всегда удовлетворительной сохранности в осадках.

Цель настоящей работы – выявить особенности распределения

кремнистых, карбонатных и агглютинированных микрофоссилий в поверхностных осадках ВСМ и КП для дальнейшего использования в палеореконструкциях.

Образцы были отобраны на шельфе ВСМ и на юго-западном склоне КП в 90 рейсе научно-исследовательского судна (НИС) “Академик М.А. Лаврентьев” (12 образцов) и в рейсе научно-экспедиционного судна (НЭС) “Михаил Сомов” (10 образцов) (рисунок). Лабораторная обработка и исследования микрофоссилий проводились согласно методикам, принятым в микропалеонтологических лабораториях России.

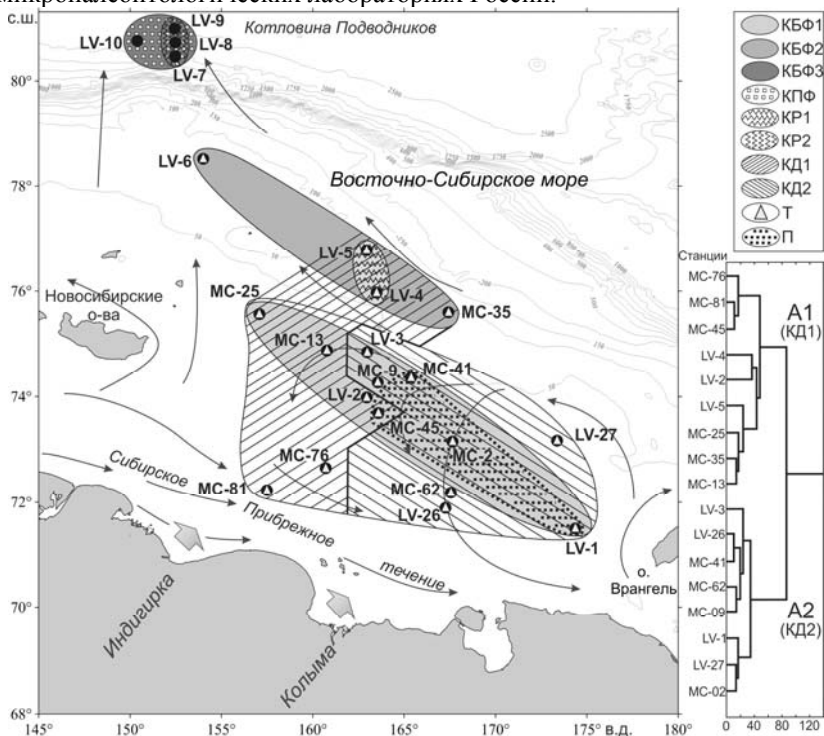


Рисунок. Месторасположение станций отбора образцов (LV – станции НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, MC – станции НЭС “Михаил Сомов”) и комплексы (К) микрофоссилий (БФ – бентосные фораминиферы, ПФ – планктонные фораминиферы, Р – радиолярии, Д – диатомеи, Т – тинтиниды, П – папулиферы. Черные точки – изученные станции, тонкие стрелки – поверхностные течения [4], широкие стрелки – речные воды [5]. Справа дендрограмма распределения диатомей и кластеры (A1 и A2).

В результате проведенных исследований в поверхностных осадках установлено 124 таксона диатомовых водорослей, 23 таксона бентосных

фораминифер, 5 таксонов планктонных фораминифер, 8 таксонов тинтиннид, 3 таксона папулифер и 4 таксона радиолярий. На основе различий в таксономическом составе и количественных характеристиках в каждой из этих групп установлены экологические комплексы (рисунок).

В осадках юго-западного склона КП диатомовые водоросли отмечены спорадически или отсутствуют. Встречаются океанические виды *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Neodenticula seminae*, *Shionodiscus latimarginatus*, виды, типичные для опресненных прибрежных морских вод: планктонный *Thalassiosira hyperborea* и бенто-планктонный *Paralia sulcata*, планктонный неритический аркто-бореальный вид *Thalassiosira antarctica*, и бентосные виды *Navicula superba* var. *superba* и *Navicula transitans* var. *transitans*.

Диатомеи поверхностных осадков шельфа ВСМ характеризуются преобладанием морских аркто-бореальных неритических видов и криофильных диатомей. Концентрация створок низкая и растёт с северо-запада на юго-восток, от 30 тыс. экз./г в глубоководных осадках КП до 1.9 млн./г в восточной части моря. Кластерный анализ изученных станций дифференцировал 2 комплекса диатомей (рисунок). Комплекс диатомей (КД1 – кластер А1) характеризует станции, расположенные в западной части ВСМ. Доминируют представители рода *Chaetoceros* (до 45%), со значительным вкладом солоноватоводных видов *Thalassiosira hyperborea* (до 35%), *Melosira arctica* (до 23%), *Navicula peregrina* (до 22%), *Paralia sulcata* (до 12.5%), *Melosira moniliformis* var. *octogona* (до 10%), повышенные концентрации которых и ранее отмечались в этом районе [2, 3]. Стоит отметить довольно высокое содержание криофильных диатомей (до 29%) и спор рода *Chaetoceros* (21–24%) в осадках станций, расположенных к северо-востоку от устья р. Индигирка. Комплекс диатомей (КД2 – кластер А2) характерен для осадков станций, расположенных в юго-восточной части ВСМ. В них преобладают морские аркто-бореальные неритические виды *Thalassiosira antarctica* (до 41%), представители рода *Chaetoceros* (до 35%), криофилы (до 21%). Средние значения солоноватоводных *Th. hyperborea* и *M. arctica* не превышают 10%. Практически на всех станциях отмечены аркто-бореальные неритические виды *Thalassiosira nordenskioldii* и *Bacterosira bathyomphala* (до 7 и 9% соответственно), указывающие на влияние тихоокеанских вод.

Бентосные фораминиферы подразделяются на три комплекса, таксономический состав которых меняется с удалением от береговой зоны (рисунок). Комплекс бентосных фораминифер 1 (КБФ1) с внутренней части шельфа ВСМ (глубины 34–45 м) включает 14 таксонов. Характеризуется присутствием *Spiroplectammina biformis*, *Ammotium cassis*, *Ammotium inflatum*, *Retroelphidium subclavatum*, *Elphidiella groenlandica*, *Criboelphidium* cf. *goesi* subsp. *cognatum*, *Elphidium incertum*, *Textularia torquata*, *Buccella* cf. *frigida*, *Nodosinella* sp. и др. Комплекс бентосных фораминифер 2 (КБФ2) с внешней части шельфа ВСМ (глубины 57–104 м)

включает 10 таксонов. Характеризуется присутствием *Alveolophragmium orbiculatum*, *Recurvoides turbinatus*, *Reophax excentricus*, *Quinqueloculina curta*, *Haplophragmoides hancocki*. Комплекс бентосных фораминифер 3 (КБФ3) с юго-западного склона КП, (глубины 1985–2546 м) включает 8 таксонов. Характеризуется преобладанием *Cibicides wuellerstorfi* и присутствием *Cibicides rotundatus*. Кроме этого, отмечаются различия бентосных фораминифер в западной и восточной частях ВСМ. Так, виды *A. inflatum*, *R. excentricus*, *A. orbiculatum* и *H. hancocki* обнаружены только в западной части, тогда как виды *E. incertum*, *E. advenum*, *C. cf. goesi* subsp. *cognatum* и *B. cf. frigida* – только в восточной. Следует отметить, что в диапазоне глубин 18–28 м (зона влияния Сибирского Прибрежного течения) бентосные фораминиферы в наших пробах практически отсутствуют.

Планктонные фораминиферы встречены на юго-западном склоне КП. Численность варьирует от 12 до 312 экз./г осадка. Таксономический состав представлен пятью видами: *Neogloboquadrina pachyderma*, *Neogloboquadrina incompta* (= *N. pachyderma* dex.), *Globigerina bulloides*, *Turborotalita quinqueloba* и *Globigerinita uvula*. Отмечена большая морфологическая изменчивость доминантного вида *N. pachyderma* (выявлено четыре морфотипа). Суммарное процентное содержание двух видов *N. pachyderma* и *G. bulloides* достигает 98–100%. Причем первый из видов резко доминирует (от 87 до 91%) на всех станциях.

Лорики инфузорий-тинтиннид обнаружены в образцах шельфа ВСМ. Таксономический состав представлен 7 видами и внутривидовыми таксонами: *Stenosemella nivalis*, *Tintinnopsis fimbriata*, *Tintinnopsis ventricosoides*, *Tintinnopsis sinuata*, *Tintinnopsis urnula*, *Tintinnopsis* sp. 1 и *Tintinnopsis* sp. 2. Наибольшее распространение и количество в осадках имеет вид *S. nivalis*, который встречен во всех изученных образцах. Его содержание в среднем от 3 до 6 экз./преп., но в образцах на станциях МС-9, 41 и 45 оно достигает 35–66 экз./преп.

Папулиферы в поверхностных осадках ВСМ обнаружены впервые и встречены только в юго-восточной части моря (рис.). Таксономический состав представлен *Fusopsis* sp., *Sphaeropsis* sp. 1 и *Sphaeropsis* sp. 2. Содержание от 1 до 3 экз./преп. Эти формы имеют высокое морфологическое сходство с таковыми из Чукотского моря [6] и, вероятно, могут быть цистами тинтиннид из родов *Cyrtostrombidium* и *Strombidium*.

Радиолярии в осадках ВСМ впервые обнаружены в северо-восточной части моря, в которой соленость воды в придонных слоях составляет 32–33‰ (глубина 57–104 м), а также встречены в осадках КП. Несмотря на низкую концентрацию скелетов в осадках, в исследуемом районе можно весьма условно выделить два комплекса. Комплекс радиолярий 1 (КР1) в осадках внешней части шельфа ВСМ, (глубины 57–104 м) представлен таксонами преимущественно спиральной группы радиолярий из родов *Spirema* и *Lithelius*. Комплекс радиолярий 2 (КР2) в осадках юго-западного

склона КП, (глубины 1985–2546 м) состоит преимущественно из сферических таксонов, принадлежащих роду *Actinomma*, а также таксонов из семейства Spongodiscidae.

Таким образом, распределение микрофоссилий четко отражает современные гидрологические условия в регионе. Прослеживаются закономерные отличия комплексов микрофоссилий в зависимости от глубины, солености, речного стока, поверхностных течений. Комплексное изучение нескольких групп микрофоссилий повысит достоверность будущих палеореконструкций, компенсируя ограничения, связанные с сохранностью отдельных групп (растворение, перенос).

Авторы признательны А.С. Астахову за предоставленный материал, Л.В. Осиповой за химико-техническую обработку образцов для диатомового анализа. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-00107, <https://rscf.ru/project/24-27-00107/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volkmann R. Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters // *Berichte zur Polarforschung*. 2000. V. 361. 100 p.
2. Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир, 1997. 146 с.
3. Obrezkova M.S., Tsoy I.B., Kolyada A.E. et al. Distribution of diatoms in seafloor surface sediments of the Laptev, East Siberian, and Chukchi seas: implication for environmental reconstructions // *Polar Biology*. 2023. V. 46. P. 21–34.
4. AMAP. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway. 1998.
5. Национальный атлас России. Т. 2: Природа и экология / Ключко А.А., Романовская М.А., Гречушникова М.Г. и др. М.: ФГУП "ГОСГИСЦЕНТР", 2004. 495 с.
6. Dolan J.R., Yang E.J., Moon J-K. On Papulifères, putative ciliate cysts of diverse morphologies, with new observations from the plankton of the Chukchi Sea (Arctic Ocean) // *Acta Protozoologica*. 2023. V. 62. P. 1–20.

Diatoms, radiolarians, benthic and planktonic foraminifera, tintinnid ciliates, and presumably their cysts – papulifères were studied in the surface sediments of the East Siberian Sea and the southwestern part of the Podvodnikov Basin. The distribution patterns of these microorganisms in the sediments allowed for the identification of three assemblages, which reflect different environmental conditions.

Вишневская В.С.^{1,2}, Амон Э.О.²

(¹Геологический институт РАН, Москва, ²Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва)

**Эволюция радиолярий баженовского морского
палеобассейна (поздняя юра – начало раннего мела)**

Vishnevskaya V.S.^{1,2}, Amon E.O.²

(¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, ²Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow)

**Evolution of the radiolarians of the bazhenov marine paleobasin
(late Jurassic – early Cretaceous)**

Ключевые слова: Баженовская свита, радиоляриевая биостратиграфия, палеогеография, поздняя юра - ранний мел, Западная Сибирь, Арктика

В статье приведена история эволюции фауны радиолярий в позднелюрско-раннемеловое баженовское время, опирающаяся на стратиграфию и палеогеографию, и показывающая этапность развития этих кремнистых протистов на территории Западной Сибири и прилегающей Арктики.

Отсчет истории развития позднелюрско-раннемеловой радиоляриевой фауны в регионе следует вести, скорее всего, от кимериджа, или, возможно, от пограничного интервала позднего оксфорда?–кимериджа, но ее подлинное разнообразие и расцвет приходится на более позднее время. Западносибирская радиоляриевая кремнистая биота была сформирована в самом начале выходцами-вселенцами из, скорее всего, Печорского, бассейна (*Parvicingula papulata* Kozlova et Vishnevskaya происходит из Печорского региона), а тот, в свою очередь, имел устойчивые водные связи с основными мировыми акваториями того времени.

Палеобатиметрический анализ показал, что море было относительно глубоководным, большинство исследователей оценивают глубину в 200–500 м, или назывались большие глубины: до ~700–750 м в глубоководных частях. Впрочем, вопрос о глубоководности баженовского моря все еще остается дискуссионным, и другие специалисты приводят доказательства в пользу относительной мелководности моря баженовского времени. В частности, предложено рассматривать в качестве аналогии баженовского бассейна современные Карское или Восточно-Сибирское моря, первое из которых имеет глубины (за исключением желобов) до 100 м, а второе – до 200 м [11]. Периодами море кратковременно мелело в силу регрессивных событий, обусловленных тектоникой, и развивались штормовые условия, с формированием темпеститов [14, 15] и микробиолитов [3].

В ракурсе интересующей нас проблемы распространения радиолярий следует отметить, что радиолярии тяготели к районам более глубоких, а не самых прибрежных вод баженовского моря. А именно, они отмечены в зоне

с глубинами более ~400 м совместно с другими планктонными организмами (кокколитофориды, перединеи, динофлагеллаты) и представителями нектона (головonoгие моллюски аммониты, теутиды, не имевшие твердого скелета, реже белемниты, онихиты) [2, 13].

Согласно современному распространению радиолярий в водном столбе (рисунок, левая часть) можно утверждать, что максимальные глубины имел ниже-средневожский бассейн, где обитали высококонические *Parvicingula* и *Pachycingula* с апикальным рогом, многослойные и губчатые (на рисунке они занимают нижний ярус с глубинами от 300 до 1000 м) и высококонические пористо-ячеистые *Parvicingula* и *Takemuraella* (ярус глубин от 100 до 300 м). На месте современных Мансийской, Надымской мегавпадин и Уренгойской котловины существовала вытянутая с севера на юг псевдоабиссальная Центральная впадина.

В ранневожское время, вероятно, существовало теплое течение, шедшее с северо-востока или северо-запада, а, возможно, и юга, которое заносило виды радиолярий, характерные для относительно теплых поверхностных вод, в ямальскую часть баженовского моря [5, 6]. Это хорошо согласуется с температурами предложенными для позднего кимериджа–волги (13–25°C, в среднем 20°C, [10]). Прохладные воды поступали через северные проливы благодаря глубинным течениям [2] и апвеллингу, обогащая планктонную биоту питательными веществами. Радиолярии в апвеллинговых обстановках увеличивали численность, а их комплексы обогащались относительно глубоководными высококоническими представителями рода *Parvicingula* и другими холодноводными формами [7, 9, 20].

В средневожском комплексе отмечается резкое увеличение количества (от 40% к 75%) и разнообразия видов высококонических форм рода *Parvicingula*, тяготеющих к значительным глубинам среды обитания, что хорошо согласуется с исчезновением бентосной фауны [10]. Основное отличие поздневожских радиолярий баженовской свиты – огромное количество среди них иглистых населлярий. На примере современных бассейнов показано, что вблизи апвеллинга часто встречаются виды населлярий с сетью длинных отростков на цефалисе, не наблюдавшиеся в пелагических районах [12]. Действительно, современные спумеллярии предпочитают приповерхностный слой воды, в то время как населлярии заселяют глубинные воды, обогащенные питательными веществами, что имеет место в зонах восходящих потоков воды типа апвеллинга [16]. Следовательно, для Арктической Сибири [1, 8], где широко представлены иглистые населлярии, можно предположить наличие зон апвеллинга, направленного к западу.

На сравнительно большие глубины баженовского моря указывает достижение максимального числа камер (до 15–20) у представителей рода *Parvicingula* (рис.), что ранее было известно только у *Parvicingula* из

синхронных отложений Тихоокеанской провинции [4].

Местами отмечается свал (нагромождение) скелетных остатков, игл радиолярий, ориентированных в одном направлении, что указывает на контрастность рельефа или перепад глубин и снос течениями с перезахоронением в смежной впадине, включая перенос ювенильных устриц.

В волжское время в Западной Сибири происходили процессы интенсивного видообразования, что заметно по появлению новых форм [18]. Среди населярий появляются первые многоиглстые, иглстые сатурналиды и сфероидная группа виллириделлид. Весьма характерным для конца третьей фазы является появление и усиление значения представителей семейства Echinocampidae.

При движении вверх по разрезу (берриас-ранневаланжинское время) биоразнообразие радиолярий резко падает, но возрастает число известковых диноцист, примесь спикул губок и появляются спикуловые осадки (спонголиты) [17].

Таким образом, наличие в ранне-средневолжских радиоляриевых сообществах ряда видов сем. Parvicingulidae и Saturnalidae Палеопацифики [18] показывает, что баженовский бассейн был достаточно тесно с ней связан. Появление в поздневолжско-рязанское время представителей бореального сем. Echinocampidae и виллириделлид виллириделлид [19] указывает на возрастающую изолированность атлантическо-арктических радиоляриевых сообществ.

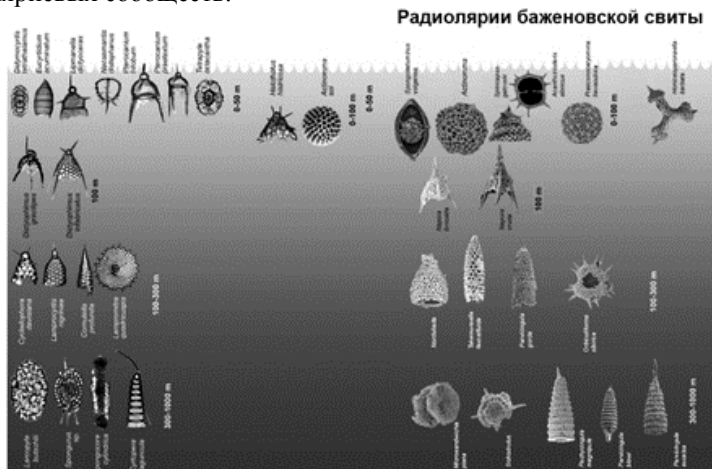


Рисунок. Распределение современных радиолярий по глубинам [16] слева и возможная модель обитания сходных по морфологии радиолярий из баженовской свиты справа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин Н.Ю. Радиоларии волжского и берриасского ярусов севера Средней Сибири // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2011. Т. 19. № 2. С. 55–69.
2. Брадучан Ю.В., Гольберт А.В., Гурари Ф.Г. и др. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность). Новосибирск: Наука, 1986. 217 с.
3. Бумагина В.А., Мартынюк Е.В., Чертина К.Н. Находки микробиолитов в баженовской свите // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 7. С. 20–24. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-7-20-24
4. Вишневская В.С., Филатова Н.И. Палеоширотные и палеогеографические условия накопления радиолариевых кремнисто-вулканогенных комплексов в мезозойской палеоазии и тенденция изменения климата (по данным аллохтонов Востока Азии) // Океанология. 2017. Т. 54. № 5. С. 685–699. DOI: 10.1134/S0001437017050186.
5. Вишневская В.С., Амон Э.О., Гатовский Ю.А. Радиолариевая биостратиграфия баженовского горизонта (верхняя юра–нижний мел) Западной Сибири // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2020. Т. 47. № 8. С. 1–20. <https://doi.org/10.1134/S0869593820060106>
6. Вишневская В.С., Амон Э.О., Гатовский Ю.А. Значение находки колониальных радиоларий в верхнеюрских отложениях Арктической зоны Западной Сибири (полуостров Ямал) // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 965–978. DOI: 10.31857/S0030157422050203
7. Вишневская В.С., Гатовский Ю.А., Козлова В.А. Радиолариевый биогоризонт *Parvicingula khabakovi* – *Williriedellum salymicum* баженовской свиты Западной Сибири (берриас) // Современная микропалеонтология – проблемы и перспективы. М.: ПИН РАН, 2018. С. 209–212.
8. Вишневская В.С., Амон Э.О., Маринов В.А., Шурыгин Б.Н. Новая находка радиоларий раннего мела на Арктическом побережье восточной Сибири (район дельты р. Лена) // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 177–181.
9. Вишневская В.С., Балущкина Н.С., Седаева К.М., Шарданова Т.А. Обстановки осадконакопления верхнеюрско-меловых радиоларитов // Современные вопросы литологии и морской геологии – 2024. Наука. Обучение. Практика: тезисы докладов. М.: МАКС Пресс, 2024. С. 47–49. <https://doi.org/10.29003/m4194.978-5-317-07258-2>
10. Захаров В.А. Условия формирования волжско-берриасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 552–568.
11. Иванов К.С., Волков В.А., Вахрушева Н.В. Палеогеография баженовской свиты Западной Сибири по данным распределения редкоземельных

элементов // Докл. Академии наук. 2019. Т. 488. № 2. С. 181–184. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524882181-184>

12. Кругликова С.Б. Радиолярии Polycystina из донных отложений Мирового океана как биоиндикаторы изменения окружающей среды. М.: ГЕОС, 2013. 231 с.

13. Маринов В.А., Меледина С.В., Дзюба О.С. и др. Биофациальный анализ верхнеюрских и нижнемеловых отложений центральных районов Западной Сибири // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 4. С. 81–96.

14. Стафеев А.Н., Ступакова А.В., Суслова А.А. и др. Баженовский горизонт Сибири (титон – нижний берриас): тектонические и гидродинамические условия осадконакопления // Георесурсы. 2019. Т. 21(2). С. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.117-128>

15. Щепетова Е.В., Панченко И.В., Барабошкин Е.Ю. и др. «Рыбные» темпеститы в углеродистых отложениях баженовского горизонта и палеобатиметрия баженовского моря Западной Сибири // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии: VI Всерос. сов. Махачкала: АЛЕФ, 2015. С. 320–324.

16. Boltovskoy D., Anderson O. R., Correa N. M. Radiolaria and Phaeodaria // Handbook of the Protists / Ed. by J. Archibald). Springer, 2017. P. 731–763.

17. Vishnevskaya V.S. The Jurassic-Cretaceous boundary in Boreal Russia: radiolarian and calcareous dinoflagellate potential biomarkers // Geol. Quart. 2017. V. 61. № 3. P. 641–654. DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1370>

18. Vishnevskaya V.S. New Late Jurassic Saturniidae (Radiolaria) of the Arctic and Pacific Margins (Russia) // Paleontol. J. 2021. V. 55. № 12. P. 1511–1524. DOI: [10.1134/S0031030121120078](https://doi.org/10.1134/S0031030121120078)

19. Vishnevskaya V.S., Kozlova G.E. Volgian and Santonian–Campanian radiolarian events from the Russian Arctic and Pacific Rim // Acta Palaeontol. Pol. 2012. V. 57. № 4. P. 773–790.

20. Vishnevskaya V.S., Amon E.O., Kalmykov G.A., Gatovsky Yu.A. Radiolarians and their role in the study of stratigraphy and paleogeography of shale oil basins (based on the example of the Bazhenovo formation in Western Siberia and the Arctic) // Paleontol. J. 2024. V. 58. № 7. P. 25–39. DOI: [10.1134/S0031030124600434](https://doi.org/10.1134/S0031030124600434)

The article presents the evolutionary history of the radiolarian fauna in the Late Jurassic–Early Cretaceous Bazhenov time based on stratigraphy and paleogeography and showing the stages of development of these siliceous protists in Western Siberia and the adjacent Arctic.

Гладенков А.Ю., Казанский А.Ю.

(Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: agladenkov@ilran.ru)

**Опыт оценки возраста палеогеновых
биостратиграфических уровней по диатомеям в разрезах
Камчатки на основе данных по магнитостратиграфии
Gladenkov A.Yu., Kazansky A.Yu.**

(Geological Institute RAS, Moscow)

**Experience of age estimates of diatom biostratigraphic levels in
Kamchatka sections based on magnetostratigraphic data**

Ключевые слова: верхний эоцен, олигоцен, Западная Камчатка, магнитостратиграфия, возраст диатомовых уровней

Обсуждаются оценки возраста уровней появления и/или исчезновения стратиграфически важных таксонов морских диатомей в опорном разрезе палеогена Западной Камчатки в бухте Квачина, полученные на основе данных по магнитостратиграфии. Возраст таких уровней определен в интервале от субхрона C13r (35.102–33.726 млн. лет) до субхрона C9r (27.859–27.439 млн. лет).

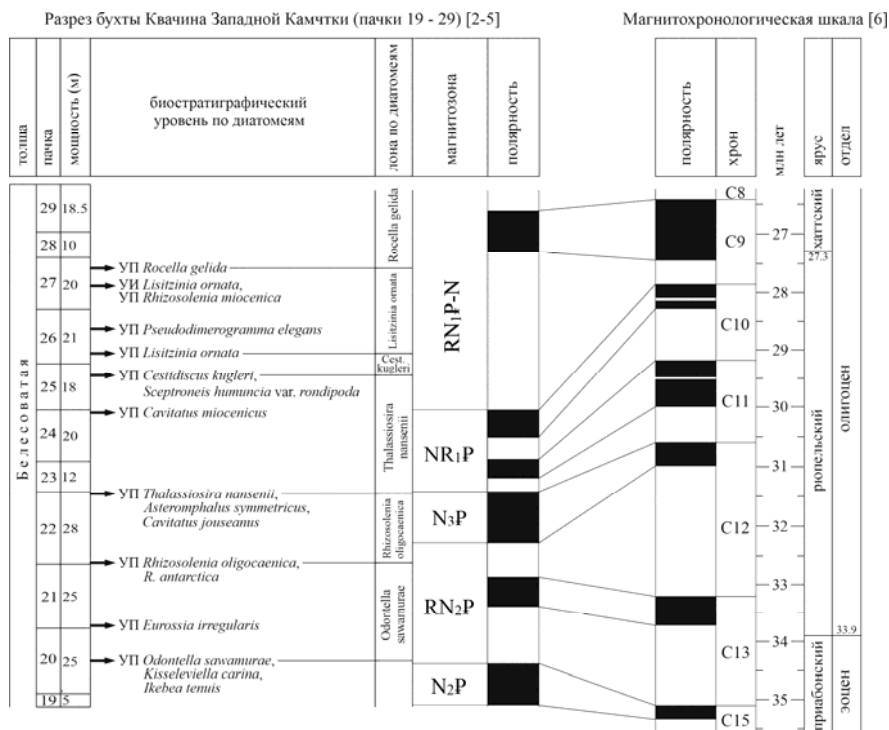
В течение последних нескольких десятилетий ископаемые морские диатомовые водоросли активно используются при детальном биостратиграфическом расчленении и корреляции разнофациальных толщ верхнего кайнозоя, которые широко развиты в Северо-Тихоокеанском регионе. Успешное практическое применение при таких исследованиях в пределах региона, включая наземные и окраинноморские разрезы, находит океаническая зональная шкала по диатомеям для олигоцена-квартера Северной Пацифики. Разработанная шкала включает диатомовые датированные уровни, которые в интервале от верхней части нижнего миоцена до квартера в разрезах глубоководных скважин напрямую скоррелированы со шкалой геомагнитной полярности, что дало возможность определить их точный возраст. Данные по подобной корреляции для более древних уровней в разрезах региона отсутствовали. Вот почему оценки возраста маркирующих олигоценовых диатомовых уровней, полученные при изучении разреза морского кайнозоя Западной Камчатки в районе бухты Квачина, представляют несомненный интерес.

Изученный стратиграфический разрез расположен в пределах Западно-Камчатской структурно-формационной зоны и относится к одному из опорных в обрамлении восточной части Охотского моря. В нем представлена практически непрерывная последовательность морских терригенных отложений от среднего эоцена до среднего миоцена, с общей мощностью более 450 м [1, 2]. Разрез включает две согласно залегающие “толщи” или свиты, разделенные на пачки: нижнюю – тигильскую, сложенную гравелито-песчанистыми образованиями (мощность около 130

м) и верхнюю – белесоватую (мощность около 330 м), представленную в основном алевролитами и аргиллитами. В верхней части разреза (мощностью около 270 м), которая относится к верхней части белесоватой толщи, были найдены ископаемые диатомеи [2–4]. В результате их изучения впервые в разрезах Камчатки прослежена последовательная смена разновозрастных диатомовых комплексов конца позднего эоцена – позднего олигоцена, в составе которых отмечено достаточно много важных для биохронологии таксонов. К ним, в частности, относятся *Lisitzinia ornata* Jousé, *Rocella gelida* (Mann) Bukry, *Rhizosolenia oligocaenica* Schrader, *R. antarctica* Fenner, *R. miocenica* Schrader, *Cavitatus jouseanus* (Sheshukova) Williams, *C. miocenicus* (Schrader) Akiba et Yanagisawa, *Odontella sawamurae* Akiba, *Ikebea tenuis* (Brun) Akiba, *Kisseleviella carina* Sheshukova, *Eurossia irregularis* (Greville) Sims, *Thalassiosira nansenii* Scherer, *Asteromphalus symmetricus* Schrader et Fenner, *Cestodiscus kugleri* Lohman, *Pseudodimerogramma elegans* Schrader, *Sceptroneis humuncia* var. *rondipoda* Scherer (рисунок). Анализ стратиграфического распространения таких видов в разрезе дал возможность выделить в нем серию смыкающихся биостратиграфических локальных зон (лон), для которых намечено сопоставление с подразделениями зональной диатомовой шкалы Северной Пацифики. Следует также подчеркнуть, что в разрезе удалось выявить последовательность палеомагнитных зон и скоррелировать их с верхнеэоценовым–олигоценовым интервалом (хронами C17–C6) Шкалы геомагнитной полярности [5]. Построенная при анализе палеомагнитных данных возрастная модель послужила основой для расчета возраста уровней появления (УП) и/или исчезновения (УИ) таксонов диатомей в соответствии с их положением в разрезе (рисунок, таблица). В этой части разреза мощностью более 150 м (рисунок) установленная палеомагнитная запись предполагает отсутствие крупных перерывов и объединяет магнитозоны прямой и обратной полярности, сопоставляемых с магнитохронологической шкалой [6] в интервале от субхрона C13g (35.102–33.726 млн. лет) до субхрона C9g (27.859–27.439 млн. лет).

Таким образом, впервые с помощью магнитостратиграфических данных подобные датировки удалось получить не только для палеогеновых разрезов Камчатки, но и Северо-Тихоокеанского региона в целом. Особенно важны оценки возраста диатомовых уровней, которые используются при зональном расчленении морских олигоценовых толщ. В первую очередь, к ним относятся УП и УИ *Lisitzinia ornata* (возраст которых определен 27.71 млн. лет и 27.54 млн. лет, соответственно) и УП *Rocella gelida* (27.49 млн. лет). Сравнение с имеющимися опубликованными данными по датировкам этих уровней в скважинах глубоководного бурения в других регионах показывает, что возраст появления *Lisitzinia ornata* близок к таковому в Южном океане (27.27 млн. лет), а появление *Rocella gelida* фиксируется раньше по сравнению с экваториальной Пацификой (~25.08 млн. лет) и

Полученные данные также указывают, что некоторые олигоценовые диатомовые уровни в определенной мере диахронны в разрезах разных широт. Например, УП *Cestodiscus kugleri* (27.76 млн. лет) несколько древнее по сравнению с таковым в экваториальной Пацифике (27.23 млн. лет). Уровни появления в камчатском разрезе *Rhizosolenia oligocaenica* и *R. antarctica* совпадают (32.30 млн. лет), тогда как в Южном океане эти виды появляются на различных и более древних уровнях (34.25 млн. лет и 33.38 млн. лет соответственно).



УП – уровень появления, УИ – уровень исчезновения в разрезе

Отметим, что впервые получены оценки возраста уровней появления таксонов, типичных для олигоценовых отложений различных районов, которые могут представлять интерес при биостратиграфических исследованиях. К ним, в первую очередь, относятся уровни появления

Thalassiosira nansonii, *Asteromphalus symmetricus* (30.64 млн. лет), *Pseudodimerogramma elegans* (27.64 млн. лет) и *Rhizosolenia miocenica* (27.54 млн. лет).

Таблица. Возраст палеогеновых биостратиграфических уровней по диатомеям в разрезе бухты Квачина Западной Камчатки, рассчитанный на основе полученных данных по магнитостратиграфии

уровень появления (УП) или исчезновения (УИ) таксона диатомей	расстояние от основания разреза (м)	полярность	субхрон	возраст (млн. лет)
УП <i>Rocella gelida</i>	343.0	обратная	C9r	27.49
УИ <i>Lisitzinia ornata</i> , УП <i>Rhizosolenia miocenica</i>	336.0	обратная	C9r	27.54
УП <i>Pseudodimerogramma elegans</i>	319.5	обратная	C9r	27.64
УП <i>Lisitzinia ornata</i>	310.0	обратная	C9r	27.71
УП <i>Cestodiscus kugleri</i> , <i>Sceptroneis humuncia</i> var. <i>rondipoda</i>	301.5	обратная	C9r	27.76
УП <i>Cavitatus miocenicus</i>	287.0	обратная	C9r	27.85
УП <i>Thalassiosira nansonii</i> , <i>Asteromphalus symmetricus</i> , <i>Cavitatus jouseanus</i>	255.5	прямая	C12n	30.64
УП <i>Rhizosolenia oligocaenica</i> , <i>R. antarctica</i>	228.5	обратная	C12r	32.30
УП <i>Eurossia irregularis</i>	204.0	обратная	C13r	34.26
УП <i>Odontella sawamurae</i> , <i>Kisseleviella carina</i> , <i>Ikebea tenuis</i>	191.0	обратная	C13r	35.08

Работа выполнена по теме Государственного задания Геологического института РАН, г. Москва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладенков Ю.Б. Расчленение опорного разреза кайнозоя бухты Квачина Западной Камчатки и проблемы его корреляции // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24. № 6. С. 101–113.
2. Гладенков Ю.Б., Гладенков А.Ю., Бордунов С.И. и др. Опорный разрез кайнозоя Западно-Камчатской структурно-формационной зоны. М.: Геокарт-ГЕОС, 2018. 202 с.
3. Гладенков А.Ю. Ярусы олигоцена и граница между палеогеном и неогеном на Западной Камчатке – новые данные по диатомеям // Неоген и четверть России: стратиграфия, события и палеогеография. М.: ГЕОС, 2018. С. 23–29.
4. Gladenkov A.Yu. New data on diatoms from the marine Cenozoic section of West Kamchatka at the Kvachina Bay // Paleontol. J. 2019. V. 53. № 8. P. 799–802.
5. Казанский А.Ю., Водовозов В.Ю., Гладенков А.Ю. и др. Магнитостратиграфия опорного разреза морского кайнозоя Западной Камчатки (бухта Квачина) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2021. Т. 29. № 1. С. 99–115.
6. Geologic Time Scale 2020. Eds. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. Elsevier BV, 2020. 1357 p.

Age estimates of levels of the first and/or last occurrences of stratigraphically important marine diatom taxa from the Cenozoic key section of West Kamchatka at the Kvachina Bay based on magnetostratigraphic data are discussed. Absolute age of such levels is determined between Subchron C13r (35.102–33.726 Ma) and Subchron C9r (27.859–27.439 Ma).

Гладенков Ю.Б.

(Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: gladenkov@ginras.ru)

Структура четвертичной системы – почему идут споры

Gladenkov Yu.B.

(Geological Institute RAS, Moscow)

Structure of the quaternary system – why there is dispute

Ключевые слова: квартал, стратиграфические подразделения, корреляционные схемы

Обсуждаются три варианта стратиграфической схемы четвертичной системы для Общей стратиграфической шкалы России, отмечаются их достоинства и недостатки. Анализируется проблема корреляции морских и континентальных образований квартера.

В 2021 г. Международная комиссия по стратиграфии (МКС) Международного союза геологических наук утвердила новый вариант стратиграфической схемы четвертичной системы, который основан на ярусном делении отделов квартера [1]. Заметим, что “ярусы” в структуре квартера были использованы МКС впервые. Для нижних границ всех этих подразделений (кроме яруса верхнего плейстоцена), были утверждены международные стратотипы (GSSP). В этом варианте квартал включает два отдела: плейстоцен и голоцен, а в плейстоцене намечены три подотдела: нижний, средний и верхний. Нижний подотдел содержит два яруса (гелазский и калабрийский). Средний представлен одним ярусом (чибанианский) (см. левую часть таблицы). Ярусное подразделение верхнего плейстоцена пока не формализовано (остается без названия). В голоцене выделены три подразделения, отнесенные к разряду “ярусов”.

К достоинствам этого варианта структуры квартера можно отнести следующее:

1. Предложенная шкала составлена на основе изучения морских (а не континентальных) разрезов, как это сделано и в других системах фанерозоя, и в ней использована *номенклатура подразделений*, близкая к таковой других фанерозойских систем, где самыми мелкими единицами являются ярусы[1].

2. Это дает возможность выделять *подразделения международной шкалы* в морских отложениях разных областей Земли и в случае надежной корреляции слоев морских и континентальных образований позволяет определять возраст последних (ледниковых, лессовых и др.).

3. В связи с этим появляется другая важная возможность – составлять *геологические карты* на одной унифицированной основе. Это относится, прежде всего, к региональным и глобальным картам и сопровождающих их легендам.

Таблица. Структура четвертичной системы в Общей стратиграфической шкале

Международная стратиграфическая шкала				Возраст (млн лет)	Стратиграфическая шкала континентальных отложений Северной Евразии							
Система	Отдел	Подотдел	Ярус		Система	Надраздел (отдел, подотдел)	Раздел	Звено	Степень			
Четвертичная	Голоцен	Верхний 0.0042	Мегхалайский Meghalayan	0.0117	Четвертичная (квартер)	Голоцен						
		Средний 0.0082	Северогриппианский Northgrippian									
	Плейстоцен	Нижний	Гренландский Greenlandian	0.129		Плейстоцен	Верхнее III		III ₄			
		Верхний	Чибанианский Chibanian						III ₃			
									III ₂			
									III ₁			
		Средний					0.774			Среднее II		II ₆
												II ₅
	Нижний	Калабрийский Calabrian		1.80					II ₄			
									II ₃			
Неогеновая			Эоплейстоцен	Верхнее E II			Нижнее I		II ₂			
									II ₁			
Плиоцен	Верхний	Пьяченцкий Piacenzian				Гелазский			I ₈			
										I ₇		
Плиоцен верхний								I ₆				
									I ₅			
Пьяченцкий								I ₄				
									I ₃			
								I ₂				
								I ₁				

4. Использование международной шкалы позволяет проводить не только

реальные сопоставления четвертичных толщ разных регионов, но и коррелировать *геологические события* разного масштаба в пределах всей Земли [2].

Однако у предложенной международной шкалы можно найти и слабые места. Так верхний ярус плейстоцена пока не назван - в связи, видимо, с тем, что не определен его стратотип (но это, видимо, будет скоро преодолено). А в голоцене выделены подразделения, названные “ярусами”, на основе изотопных данных, которые получены при изучении кернов льдов Гренландии и пещерных сталактитов Индии. Эти “ярусы”, не имеющие палеонтологической характеристики, по “длительности” резко (в сотни раз) отличаются от ярусов других систем фанерозоя. Это свидетельствует о несоответствии иерархического ранга голоцена отделу системы (существует мнение, что голоцен – это неполное межледниковье, соответствующее рангу неполного яруса фландрия). Правда, чтобы снять напряжение, предложенные единицы можно называть не ярусами, а “изотопными ярусами”. Однако перечисленные выше недостатки не являются определяющими и они, на наш взгляд, не могут принизить приведенные выше достоинства предложенной МКС шкалы.

Как известно, до последнего времени в Общей стратиграфической шкале (ОСШ) России использовалась другая структура квартера [3], основанная на климатостратиграфической основе (см. правую часть таблицы). В связи с этим возник вопрос о необходимости выбора определенной версии стратиграфической схемы квартера, которая наилучшим образом соответствовала бы, с одной стороны, современным мировым тенденциям, а с другой стороны - мог бы быть наиболее удобна при проведении геологических работ в России [4]. Для обсуждения были предложены три варианта стратиграфической схемы:

1. *Принять* предложенную в 2021 г. Международную шкалу квартера и внести в Стратиграфический кодекс России [3] соответствующие изменения.

2. *Оставить* нашу прежнюю (климатостратиграфическую) схему, хотя область ее применения охватывает только территории развития континентальных (ледниковых) отложений.

3. *Предложить компромиссный вариант* схемы, наиболее подходящий сейчас для нашей практики.

Эта проблема была обсуждена в апреле 2024 г. на заседании расширенного бюро Межведомственного стратиграфического комитета (МСК) России, где мнения разделились. По одному мнению [4], наиболее целесообразным было бы принятие варианта структуры шкалы утвержденных МКС, чтобы, как и другие страны, применять уже апробированные мировой стратиграфической практикой унифицированные подходы к расчленению четвертичных образований (прежде всего, морского происхождения) и использовать эти данные при составлении

обзорных геологических карт России. Но учитывая накопленный опыт использования действующей в России схемы при изучении ледниковых толщ отдельных (прежде всего северных) регионов, основанной в основном на климатических критериях (с выделением разделов, звеньев и ступеней), оставить на данном этапе эту схему в качестве *региональной* - для расчленения континентальных - прежде всего, ледниковых и межледниковых образований Северной Евразии (возможно, с последующим выделением горизонтов или регионарусов) (см. правую часть таблицы.). При этом принимается во внимание, что, хотя большая часть суши России покрыта континентальными отложениями квартера, в то же время на значительных ее пространствах развиты четвертичные отложения морского генезиса (приарктические районы, Камчатка, Сахалин, Приморье, юг России, шельфовые зоны арктических и восточных морей, которые сейчас активно изучаются), для расчленения которых применение подразделений типа “звено”, “ступень” просто невозможно. Использование *ярусной* стратиграфии позволит сблизить подходы к созданию структуры четвертичных схем с методами расчленения других систем фанерозоя, а устанавливаемая корреляция морских и континентальных образований сделает возможным намечать и выявлять “морские” ярусы и на суше. На практике это означает, что калабрийский ярус Международной стратиграфической шкалы (МСШ) может заменить эоплейстоцен нашей схемы, а чибанианский ярус среднего плейстоцена МСШ – заменить нижнее и среднее звенья неоплейстоцена. Если не принимать *ярусную* разбивку МСШ, то будет трудно коррелировать наши и международные подразделения, составлять обзорные схемы и карты, как и увязывать стратиграфические единицы, выделенные на суше и в океанах.

Из сказанного следует, что из трех упомянутых вариантов фактически предлагалось принять вариант № 1, который мог бы (в случае сохранения прежней схемы для континентальных образований) представлен, как *компромиссный* (то есть вариант № 3). В связи с этим предполагалось ввести в Стратиграфический кодекс две стратиграфические колонки – одну с ярусами МСШ и другую – параллельно - нашу “региональную” или “евро-азиатскую” (для континентальных толщ). В принципе этот вариант поддерживали (при проведенном предварительном голосовании) многие авторитетные специалисты, имеющие богатый опыт изучения как морского, так и континентального квартера и известные своими разработками в создании региональных и субглобальных стратиграфических схем.

Но ряд других известных специалистов (прежде всего сотрудники Института Карпинского, Санкт-Петербург) выступили за сохранение в ОСШ прежней схемы четвертичной системы, которая, по их мнению, “хорошо соответствует задачам геокартирования страны”.

Хотя на заседании в МСК не было принято окончательного решения по затронутым вопросам, в его опубликованных Постановлениях почему-то

появилось уведомление, что “Бюро МСК приняло решение – сохранить принятую в настоящее время структуру ОСШ для четвертичных отложений” [5]. Попытки внести поправки в этот документ до его публикации успеха не имели. Естественно, что это решение многим геологам удовольствие не доставило.

Из этого следует, что четвертичная проблема нуждается еще в дальнейшем обсуждении, к которому, видимо, следует активно присоединиться и океанологам (прежде всего, стратиграфам).

Работа выполнена по теме государственного задания Геологического института РАН, г. Москва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Head M.J., Pillans B., Zalasiewicz J.A., the ICS Subcommittee on Quaternary Stratigraphy. Formal ratification of subseries for the Pleistocene Series of the Quaternary System // Episodes. 2021. V. 44. № 3. P. 241–247.
2. Гладенков Ю.Б. Стратиграфия начала XXI века (историко-геологическое изучение стратисферы Земли и развития биосферы). М.: ГЕОС, 2023. 184 с. (Труды ГИН РАН. Вып. 634).
3. Стратиграфический кодекс России. Издание третье, исправленное и дополненное. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, Межведомственный стратиграфический комитет, 2019. 96 с.
4. Гладенков Ю.Б., Тесаков А.С. О современной структуре четвертичной геологической системы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2023. Т. 31. № 5. С. 140–144.
5. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 49. СПб.: Изд-во Института Карпинского, 2025. 40 с.

Three variants of the stratigraphic scheme of the Quaternary System for the General Stratigraphic Scale of Russia are discussed, and their advantages and disadvantages are noted. The problem of correlation of marine and continental Quaternary deposits is analyzed.

Голованова О.В.

(Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: golovanova2000@mail.ru)

Специфические механизмы возникновения дефицита кислорода в прибрежной зоне современных и древних морей и океанов при субмаринной разгрузке подземных вод
Golovanova O.V.

(Geological Institute, RAS Moscow)

Specific mechanisms of coastal hypoxia phenomenon in modern and ancient seas and oceans during submarine groundwater discharge

Ключевые слова: обстановки осадконакопления, дефицит кислорода, субмаринная разгрузка подземных вод, палеобиособытие

Анализом новейших исследований субмаринной разгрузки подземных вод в моря и океаны показано значение литологического состава водоносных горизонтов и физико-био-химических взаимодействий в формировании привносимых форм химических компонентов, ответственных за снижение концентрации растворенного кислорода. Результаты актуальны для углубления понимания механизмов экологических кризисов современности и палеобиособытий.

Актуальной проблемой деоксигенации океана является потенциальное расширение зон с дефицитом кислорода в условиях глобального потепления [1]. За последние несколько десятилетий уровень растворенного кислорода как в открытом океане, так и в прибрежных водах снизился, что в основном объясняется изменением климата и антропогенным поступлением питательных веществ. Хотя ожидается, что продолжающаяся потеря кислорода в океане сохранится из-за повышения глобальной температуры и усиления стратификации океана, такие факторы, как вентиляция океана и его продуктивность, могут существенно усложнить эти тенденции.

В настоящее время все больше доказательств предоставляется в подкрепление тезиса о том, что гипоксия прибрежных вод часто связана с различными типами эвтрофикации и закисления [2, 3]. Нередко одни и те же формы компонентов одновременно являются и нутриентами для биоса, и агентами, снижающими концентрацию кислорода. Питательные вещества, фитопланктон, бактериопланктон и т.д. могут поставляться с водами континентального поверхностного и подземного стока естественного и антропогенного характера, ветровым переносом, морскими и океаническими течениями. В прибрежных экосистемах поступающие питательные вещества способствуют развитию цветения фитопланктона, особенно на фоне развития плотностной стратификации, апвеллинга и т.д. В условиях стратификации осаждение, потребление и разложение органического вещества способствует значительному снижению

содержания растворенного кислорода в придонных водах, не способных быстро обмениваться кислородом с атмосферой. В результате созданных условий возникают экологические кризисы разного порядка, вплоть до формирования обширных «мертвых зон» регионального масштаба [3].

Специфика воздействия субмаринной разгрузки подземных вод, определяющая необходимость ее исследования, в том числе и как одного из факторов дезоксии, заключается в том, что в одних случаях, значительную часть разгружающихся подземных вод составляют воды метеорного генезиса, которые имеют резко отличные ключевые характеристики состава, в других случаях, при рециркуляции морской воды и/или физико-биохимических реакций массообмена с породой, в прибрежные области акваторий поступают воды, состав которых существенно изменен [3, 4]. Помимо этого, и в связи с тем, что концентрации химических компонентов в прибрежных водоносных горизонтах, как правило, значительно выше, чем в поверхностных водах, даже при относительно невысоких дебитах субмаринная разгрузка имеет значительный экологический эффект.

Значительные изменения форм и концентраций привносимых подземным водами химических компонентов обуславливаются литологическим составом водовмещающих отложений. В водоносных горизонтах с низким или пониженным содержанием органического вещества реактивные элементы легче удаляются и происходит рост pH за счет адсорбции H^+ на оксидных поверхностях [5] или из-за образования CO_2 при дыхании организмов [6]. Богатые органическим веществом литолого-геофильтрационные среды существенно обогащены восстановленными формами элементов и различными реминерализованными компонентами органического вещества, в том числе питательными растворенными веществами, (органический и неорганический углерод, азот и фосфор), флуоресцентными растворенными органическими веществами и микроэлементами. Их pH обычно ниже. Окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные равновесия в водоносных горизонтах весьма подвижны, они воздействуют на процессы нитрификации-денитрификации, сорбции-десорбции, удаления, либо обогащения подземных вод кремнеземом, фосфором, железом, алюминием, марганцем и прочими, конкурирующими за места на сорбционных ячейках, [7]. В результате органическое вещество, если им в значительной степени обогащены водоносные отложения, чаще всего определяет поступление в подземные воды множества растворенных форм питательных веществ [8–10].

Микробиальный состав поровых вод на участках субмаринной разгрузки также изменяется в зависимости от лито-типов водовмещающих отложений [11]. Определяющими факторами является ОВ-потенциал и соотношение C/N. Преобладание водовмещающего крупнозернистого песка в водоносном горизонте определяет окислительную среду, аэробные и факультативные бактерии и метанотрофы. В слое торфа распространена восстановительная,

анаэробная среда, сульфатредуцирующие, ферментативные бактерии и метаногенные археи, характерные для торфяных болот.

В контексте формирования дефицита кислорода, вызванного субмаринной разгрузкой подземных вод, следует отметить особое значение содержания органического вещества в породах водоносных горизонтов. Окисление ОВ в прибрежных водоносных горизонтах приводит к образованию побочных продуктов (сульфид, аммиак, растворенный органический углерод и азот, метан, восстановленные металлы) [2, 4]. Разгрузка подземных вод, обогащенных этими компонентами, существенно снижает концентрацию растворенного кислорода в прибрежных областях акваторий морей и океанов. Зафиксированы периодические заморы рыбы, вызванные дезоксией в летний период, формирование которой объясняется поступлением при субмаринной разгрузке восстановленных форм компонентов на фоне сезонных колебаний уровня моря и недостатка газообмена с атмосферой [4].

Таким образом, для объяснения формирования обстановок дефицита кислорода в прибрежных водах морей и океанов необходимы исследования потоков компонентов, поступающих при субмаринной разгрузке подземных вод, установление литолого-геофильтрационного строения прибрежных водоносных комплексов и условий формирования подземных вод. Специфика субмаринной разгрузки подземных вод как фактора дезоксии в прибрежных водах определяется доставкой форм компонентов, понижающих концентрацию кислорода. На основании данных новейших исследований можно суммировать, что наиболее усиленная генерация таких форм происходит при наличии на водосборных площадях прилегающей континентальной суши болот, торфяников и прочих, обуславливающих обогащение почв и пород водоносных горизонтов органическим веществом.

Для обстановок открытого океана все сказанное выше сохраняет свою актуальность, поскольку диффузионные потоки поровых вод из донных осадков, в которых как правило распространены восстановительные условия, развиваются на огромных площадях и доставляют восстановленные формы компонентов, которые могут вызывать расход кислорода и снижение его концентрации как минимум в придонных водах. Низкие скорости диффузионных массопотоков не позволяют осуществляться быстрому выносу продуктов деминерализации органического вещества, сохраняя восстановительный потенциал донных осадков и обеспечивая поставку оптимума нутриентов. Эти “фоновые” процессы нарушаются при вспышках биопродуктивности в кризисных условиях избыточной эвтрофикации и/или существенной дезоксии, причины которых все еще остаются до конца не выясненными. Поэтому исследование массопотоков из донных осадков в придонные воды морей и океанов, значительная часть которых осуществляется путем субмаринной разгрузки подземных (и поровых) вод, может привести к значительным

вклад в понимание развития кризисных событий в морях и океанах современности и геологического прошлого: гипертермальных событий таких, как палеоцен-эоценовый термальный максимум (PETM), гипертермалы эоцена (E1/E2, F1, F2, G, ETM2, ETM3) и прочие, в продвижение решения вопроса аноксии/дезоксии в ходе так называемых океанических аноксических событий: Фараони (поздний готерив), Селли (ранний апт, ОАЕ 1a), пограничного сеноман-туронского события (ОАЕ-2) и многих других.

Работа выполнена в рамках госзадания ГИН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yao W., Kong T., Wang X.T. et al. Expanded subsurface ocean anoxia in the Atlantic during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum // *Nature Communications*. 2024. V. 15. 9053. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53423-x>
2. Santos I.R., Chen X., Lecher A.L et al. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry // *Nature Reviews Earth & Environment*. March 2021. DOI: 10.1038/s43017-021-00152-0
3. Moore W.S. The role of submarine groundwater discharge in coastal biogeochemistry // *Geochim. Explor.* 2006. V. 88. P. 389–393. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.082>.
4. Moore W.S., Shiller A., Benitez Nelson C. et al. SGD OD: investigating the potential oxygen demand of submarine groundwater discharge in coastal systems // *Scientific Reports*. 2024. V. 14. 9249. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59229-7>
5. Lee J., Kim G. Dependence of pH in coastal waters on the adsorption of protons onto sediment minerals // *Limnol. Oceanogr.* 2015. V. 60. P. 831–839. doi: 10.1002/lno.10057
6. Cyronak T., Santos I.R., Erler D.V. et al. Drivers of pCO₂ variability in two contrasting coral reef lagoons: the influence of submarine groundwater discharge // *Global Biogeochem. Cycles*. 2014. V. 28. P. 398–414. doi: 10.1002/2013GB004598
7. Cho H.M., Kim J.H., Kim G. Desorption of phosphate on sandy sediments by silicate in groundwater // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2019. V. 257. P. 184–190. doi: 10.1016/j.gca.2019.05.003
8. Kim T.H., Kwon E., Kim I. et al. Dissolved organic matter in the subterranean estuary of a volcanic island, Jeju: importance of dissolved organic nitrogen fluxes to the ocean // *J. Sea Res.* 2013. V. 78. P. 18–24. doi: 10.1016/j.seares.2012.12.009
9. Sadat-Noori M., Maher D.T., Santos I.R. Groundwater discharge as a source of dissolved carbon and greenhouse gases in a subtropical estuary // *Estuar. Coasts*. 2016. V. 39. P. 639–656. doi: 10.1007/s12237-015-0042-4

10. Stewart B., Bryan K.R., Pilditch C.A., Santos I.R. Submarine groundwater discharge estimates using radium isotopes and related nutrient inputs into Tauranga Harbour (New Zealand) // *Estuar. Coasts*. 2018. V. 41. P. 384–403. doi: 10.1007/s12237-017-0290-6
11. Adyasari D., Hassenruck C., Montiel D., Dimova N. Microbial community composition across a coastal hydrological system affected by submarine groundwater discharge (SGD) // *PLoS ONE*. 2020. V. 15(6). e0235235. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235235>

Analysis of the latest studies of submarine groundwater discharge into seas and oceans shows the importance of the lithological composition of aquifers and physical-biochemical interactions in the formation of introduced forms of chemical components responsible for reducing the concentration of dissolved oxygen. The results are relevant for deepening the understanding of the mechanisms of modern ecological crises and paleobioevents.

Дорохова Е.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва,
e-mail: zhdorokhova@gmail.com)

**Гранулометрические тренды в осадках контуритовых
дрифтов северной долины трансформного разлома Чарли-
Гиббс и прилегающего фланга Срединно-Атлантического
хребта**

Dorokhova E.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Grain size trends in sediments of contourite drifts of the
northern valley of the Charlie-Gibbs Fracture Zone and the
adjacent Mid-Atlantic Ridge flank**

Ключевые слова: контуриты, айсберговые фации, пелагиты, гранулометрические
параметры, анализ конечных элементов

Изучены тренды гранулометрических параметров (среднего размера и сортировки) в полифациальных осадках контуритовых дрифтов района трансформного разлома Чарли-Гиббс (Северная Атлантика). Выявлена тенденция ухудшения и последующего улучшения сортировки с увеличением среднего размера осадка. Применение метода моделирования конечных элементов в гранулометрических распределениях показало, что выявленные тренды связаны со сменой источников осадочного материала, дефицитом алевритовой фракции и смешением гранулометрических субпопуляций в диапазоне средних размеров 4–63 мкм.

Гранулометрические распределения морских осадков и их статистические параметры имеют длительную историю использования в литологии и палеогеографии для интерпретации процессов осадконакопления, изучения литодинамики, установления генезиса осадочных пород. Средний размер и сортировка являются основными статистическими параметрами гранулометрических распределений, отражающими в первом приближении изменчивость источников осадочного материала и динамику среды осадконакопления. В недавних исследованиях в контуритах (осадках, сформированных под действием придонных течений) выявлена систематическая изменчивость значений сортировки при увеличении среднего размера осадка [1–3]. Эта изменчивость приписывается смене режимов переноса осадка (во взвешенном состоянии, сальтацией или волочением) при увеличении скорости придонного течения.

В настоящей работе рассматривается соотношение среднего размера и сортировки терригенных осадков контуритовых дрифтов района трансформного разлома Чарли-Гиббс. Зона разломов Чарли-Гиббс представляет собой двойной трансформный разлом и является главной трансформной системой Северной Атлантики [4]. Долины разлома служат

основным коридором для течения Северо-Восточной глубинной воды (СВГВ), которая распространяется из Исландской котловины в море Ирмингера и входит в состав нижней ветви Атлантической меридиональной циркуляции. Недавние детальные геофизические и литологические исследования показали, что осадки долин зоны трансформных разломов Чарли-Гиббс и прилегающих межхребтовых пространств Срединно-Атлантического хребта (САХ) представлены контуритовыми дрефтами [5]. Позднечетвертичные отложения дрефтов характеризуются чередованием контуритово-пелагических, айсберговых, пелагических и турбидитовых фаций, подробно описанных в работе [5]. Контуритовый тип осадконакопления при воздействии слабых течений СВГВ преобладал в голоцене, тогда как айсберговые, пелагические и турбидитовые фации отмечаются в позднем плейстоцене. Таким образом, осадки контуритовых дрефтов долин трансформного разлома Чарли-Гиббс позволяют изучать гранулометрические тренды в полифациальных осадках.

В рамках исследования изучены осадки двух разрезов, вскрытых колонками донных осадков в контуритовых дрефтах долины северного трансформа и межгрядовой впадине прилегающего к Чарли-Гиббс фланга САХ [5]. Гранулометрический анализ проводился на лазерном анализаторе размеров частиц SALD 2300 (Shimadzu, Япония) для терригенного осадка после последовательного растворения органического вещества перекисью, карбоната кальция соляной кислотой и биогенного кремнезема гидроксидом натрия. Анализ выполнен для 230 проб. Гранулометрические параметры (средний размер и сортировка) рассчитывались в программе Gradistat [6] геометрическим методом Фолка и Варда [7]. Для выявления закономерностей в изменчивости гранулометрических параметров применен метод математического разложения измеренных гранулометрических распределений на конечные элементы (КЭ) – субпопуляции. Каждый рассчитанный КЭ отражает отделённый источник осадочного материала и/или механизм перемещения осадка [8]. Расчеты проводились в программе AnalySize [9].

В результате исследования выявлены восходящий и нисходящий тренды изменений значений сортировки при увеличении значений среднего размера. Значения сортировки изменяются от 1.8 до 7.5 мкм и демонстрируют тенденцию к ухудшению сортировки с увеличением среднего размера от 2.2 до 20–32 мкм и последующему улучшению сортировки при дальнейшем увеличении среднего размера до 102 мкм. По результатам моделирования выделено четыре КЭ. КЭ1 – одномодальный слабосортированный осадок с модой 3 мкм отражает вертикальное пелагическое осаждение при слабых придонных течениях. Выраженная мода 22 мкм КЭ2 характеризует вклад сортируемого алевроита (фракция 10–63 мкм), поступающего в осадок в результате выборочного осаждения при повышенных скоростях придонного течения. КЭ3 и 4 с хорошо

выраженными модами в тонко- и мелкозернистом песке соответствуют материалу айсбергового разноса. Моделированные КЭ показывают, что выявленный тренд ухудшения сортировки с увеличением среднего размера терригенного осадка и последующего улучшения сортировки с дальнейшим ростом среднего размера обусловлен смешиванием КЭ и не зависит от фациальной принадлежности осадка. Наилучшей сортировкой обладают осадки с максимальными вкладами КЭ1 или КЭ4 (пелит и мелкозернистый песок, соответственно). Осадки в диапазоне среднего размера 4–63 мкм характеризуются вкладом нескольких КЭ без выраженного преобладания КЭ2, имеющего преимущественно алевритовую размерность.

Таким образом, выявленные тренды гранулометрических параметров в контуритовых дрифтах Чарли-Гиббс связаны со смешением субпопуляций в диапазоне среднего размера осадка 4–63 мкм и дефицитом алевритовой фракции. В изученных осадках восходящий и нисходящий тренды сортировки с увеличением среднего размера не связаны с изменениями механизмов движения осадков при увеличении скорости придонного течения, как это было показано ранее для стандартной контуритовой модели и песчаных контуритов [1]. Следовательно, выявление общих гранулометрических трендов в полифациальных осадках и песчаных контуритах свидетельствует о большей универсальности этих трендов, чем предполагалось ранее.

Автор благодарна Е.П. Жолинской за химическую обработку проб для гранулометрического анализа. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stow D. et al. Anatomy of the bi-gradational contourite sequence: Case study from the Gulf of Cadiz // *Mar. Geol.* 2023. V. 458. № March.
2. Yu X. et al. Contourite porosity, grain size and reservoir characteristics // *Mar. Pet. Geol.* Elsevier, 2020. V. 117. № January. P. 104392.
3. Brackenridge R.E. et al. Textural characteristics and facies of sand rich contourite depositional systems // *Sedimentology* / ed. Marzo M. 2018. V. 65. № 7. P. 2223–2252.
4. Сколотнев С.Г. и др. Геолого-геофизические исследования разломной зоны Чарли Гиббс (Северная Атлантика) // *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле.* 2021. Т. 497. № 1. С. 5–9.
5. Dorokhova E. V. et al. Current-controlled sedimentation in a megatransform system: a case study of the Charlie–Gibbs Fracture Zone // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 2026. V. 553. № 1.
6. Blott S.J., Pye K. Gradstat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments // *Earth Surf. Process. Landforms.*

2001. V. 26. P. 1237–1248.

7. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters // J. Sediment. Res. 1957. V. 27. № 1. P. 3–26.

8. Weltje G.J., Prins M.A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics // Sediment. Geol. 2003. V. 162. № 1–2. P. 39–62.

9. Paterson G.A., Heslop D. AnalySize: New methods for unmixing sediment grain size data. 2015. Vol. 16, № 12. P. 4494–4506.

The trends in grain size parameters (mean size and sorting) in polyfacial sediments of contourite drifts of the Charlie-Gibbs Fracture Zone area (Northern Atlantic) have been studied. Tendencies of worsening and subsequent improvement in sorting were identified with an increase in the mean size of the sediment. Applying the end-member modeling to the grain size distributions showed that the identified trends are related to a change in the sources of the sedimentary material, a lack of aleuritic fraction and the mixing of grain-size subpopulations in the 4–63 μm mean size range.

Захарова А.А.^{1,2}, Овсепян Е.А.¹

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ²Московский государственный университет, г. Москва, e-mail: sunnyju7@gmail.com)

Комплексы бентосных фораминифер как индикаторы изменений условий окружающей среды в голоцене в проливе Кембридж, Земля Франца-Иосифа

Zakharova A.A.^{1,2}, Ovsepyan E.A.¹

(¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Benthic foraminiferal assemblages as indicators of environmental changes during the Holocene, Cambridge Strait, Franz Josef Land

Ключевые слова: Баренцево море, бентосные фораминиферы, климат

Количественные анализы комплексов бентосных фораминифер выполнены в 32 образцах по колонке АМК-5455, отобранной из пролива Кембридж, Земля Франца Иосифа, в северо-восточной части Баренцева моря. В результате работы выделено 7 комплексов, отражающих последовательную смену океанологических условий в голоцене.

Пролив Кембридж, расположенный между островами Земля Принца Георга и Земля Александры в архипелаге Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) в восточном секторе Баренцева моря, является ледниковым фьордом. Область практически круглый год покрыта льдом, вследствие чего характер дна, условия окружающей среды и фаунистические комплексы изучены слабо. В настоящее время сравнительно теплые подповерхностные атлантические воды (АВ), транспортирующие тепло в Арктику по краю евразийского континента, опускаются под слой более холодных арктических вод (АрВ) к северо-западу от Шпицбергена и поступают в Баренцево море с севера через желоба. Согласно результатам предыдущих исследований, АВ проникали в желоб Франц-Виктории к западу от ЗФИ в голоцене [11]. Комплексы бентосных фораминифер (БФ) из колонки АМК-5454, отобранной в проливе Кембридж, представляют собой первые данные о поверхностных и придонных водах и связанных с этим изменениях в фаунистических комплексах в проливе Кембридж за последние 9.2 кал. тыс. лет. В период с 6.3 до 4.1 кал. тыс. лет назад условия характеризуются высокой продуктивностью, на что указывают комплексы индикаторных видов БФ [4].

Объектом данного исследования является колонка донных осадков АМК-5455 (80°31.986 с.ш., 47°24.251 в.д., глубина 546 м), отобранная в Баренцевом море в ходе 67-ой экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2016 г. БФ были идентифицированы до вида и подсчитаны в 32-

х промытых и высушенных образцах во фракции >0.1 мм. В каждом образце подсчитывалось не менее 100 раковин БФ [5]. В случае обилия раковин проба была разделена микросплиттером Отто на равные части. Как правило, отквартованная часть содержала около 200–250 раковин БФ. Все найденные раковины были определены до вида. Процентное содержание каждого вида было рассчитано в каждом образце. Количественные анализы комплексов БФ для верхних 80 см колонки были выполнены Д.А. Кожановой.

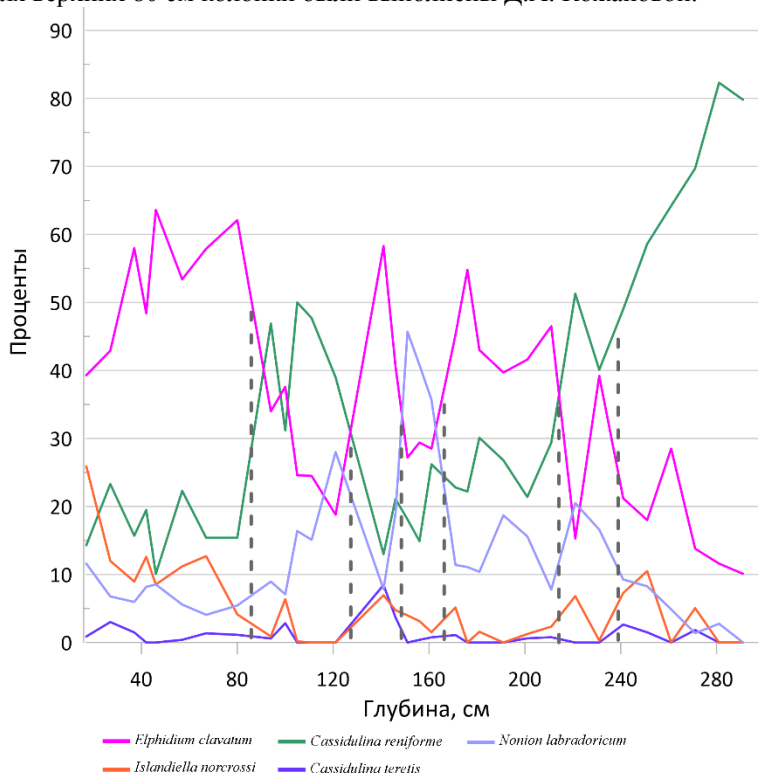


Рисунок. Процентное соотношение массовых видов БФ в колонке АМК-5455

Интервал I (290–240 см) характеризуется обилием *C. reniforme*, процентное содержание которой снижается к верхней границе интервала. В настоящее время данный вид обитает в Арктике, в суровых обстановках внутренних частей фьордов в непосредственной близости от зоны разгрузки ледников [6]. Этот вид предпочитает холодноводные условия и является типичным обитателем районов, подверженных влиянию полярных водных масс [11]. Кроме того, *C. reniforme* не может существовать при солености ниже 30‰ [7]. Преобладание в комплексе *C. reniforme* свидетельствует о

прохладном климате, низких температурах придонных вод и близости ледника на окружающей суши. В интервале также встречен индикатор стрессовых условий *E. clavatum*, содержание которого постепенно увеличивается к верхней границе интервала (рисунок). Распространение *E. clavatum* в южной части Баренцева моря ограничено температурами воды выше -4°C и/или границей зимнего морского льда [6]. Кроме того, известно, что этот вид активно размножается в условиях поступления фитодетрита на дно [9]. Вероятно, уменьшение содержания *C. reniforme* и синхронное увеличение доли *E. clavatum* отражает постепенное потепление климата, начало отступления ледника и увеличение биопродуктивности поверхностных вод. На повышение биопродуктивности во время накопления Интервала I указывает и увеличение содержания вида *N. labradoricum*, который часто приурочен к областям Полярного фронта с активным поступлением фитодетрита на дно [1, 8, 10].

Интервал II (240–215 см) характеризуется скачкообразным повышением процентного содержания *C. reniforme*, *N. labradoricum* и *I. norcrossi*, а также уменьшением доли *E. clavatum*. Понижение процентного содержания *E. clavatum* может свидетельствовать о более стабильных океанологических условиях и повышенной биопродуктивности поверхностных вод, но при этом вероятно близость ледника к границам окружающей пролив суши.

Интервал III (215–165 см). В этом интервале доминирует *E. clavatum* (35–55%). Доля *C. reniforme* в комплексе БФ значительно ниже, чем в нижележащем интервале. Такое распределение БФ может свидетельствовать об обилии фитодетрита и вероятном отступлении ледника вглубь суши. Отсутствие *C. teretis* в данном интервале возможно указывает на отсутствие влияния АВ на изменение условий в проливе Кембридж во время накопления Интервала III.

Интервал IV (165–145 см). В пределах данной части осадочного разреза выявлено максимальное процентное содержание *N. labradoricum*, что может свидетельствовать о повышении биопродуктивности поверхностных вод и потока свежего органического вещества на дно в районе исследования. Пик процентного содержания *N. labradoricum* может указывать и на присутствие пузырькового метана на дне [1–3]. В результате предыдущих исследований установлено, что *N. labradoricum* обилен в областях разгрузки метана к западу от архипелага Шпицберген [1]. Минимальная доля *C. reniforme* в Интервале IV, по-видимому, указывает на дальнейшее отступление ледника от береговой линии.

Интервал V (145–125 см) характеризуется высоким содержанием *E. clavatum* и пониженной долей *C. reniforme* и *N. labradoricum*, что свидетельствует о снижении биопродуктивности поверхностного слоя воды и уменьшении потока органического вещества на дно в условиях отступившего вглубь суши ледника. Слабое повышение содержания *C. teretis* и *I. norcrossi*, вероятно, указывают на низкую температуру

придонных вод. Так как содержание индикатора АВ *C. teretis* невелико, можно предположить, что АВ практически не проникали в пролив Кембридж в этот период. Однако приток АВ, проникающих в пролив Кембридж из желоба Франца-Виктории под холодными АрВ и морским льдом, был зафиксирован за последние 4.5 тыс. лет на основе данных по колонке АМК-5454 [4]. В целом, условия накопления данного интервала сходны с обстановками формирования Интервала III.

Интервал VI (125–90 см). Резкое повышение процентного содержания раковин *C. reniforme* и *N. labradoricum*, снижение доли *E. clavatum*, отсутствие раковин *C. teretis* и *I. norcrossi* может свидетельствовать, с одной стороны, о наступлении ледника, а с другой – об обилии фитодетрита на дне в результате все еще повышенной биопродуктивности поверхностных вод.

Интервал VII (90–0 см). В этом интервале доминирует вид *E. clavatum*. Обстановки на дне частично напоминают условия накопления осадка в интервале III, судя по доминированию *E. clavatum*. Однако численность *I. norcrossi* резко возрастает в течение данного отрезка времени вверх по разрезу. Данный вид чаще всего встречается в районах с сезонным морским льдом, распределение может быть связано с летней продуктивностью вблизи кромки льда [6, 9]. Пониженное процентное содержание *N. labradoricum* также может указывать на снижение концентрации метана на дне, либо о сокращении количества поступающего в бассейн фитодетрита.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИО РАН № FMWE-2024-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cedhagen T. Retention of chloroplasts and bathymetric distribution in the sublittoral foraminiferan *Nonionellina labradorica* // *Ophelia*. 1991. V. 33. P. 17–30.
2. Corliss B.H. Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean // *Marine Micropaleontology*. 1991. V. 17. P. 195–236.
3. Dessandier P.A., Borrelli C., Kalenitchenko D., Panieri G. Benthic Foraminifera in Arctic methane hydrate bearing sediments // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00765>.
4. Ivanova E.V., Novichkova E.A., Kozhanova D.A. Foraminiferal and dinocyst associations as indicators of the Holocene environmental changes at the Cambridge Strait, Franz Josef Land // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci*. 2020. V. 438. 012011.
5. Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages // *Marine Micropaleontology*. 2002. V. 45 (2). P. 169–174.
6. Hald M., Korsun S. Distribution of modern benthic foraminifera from fjords of Svalbard, European Arctic // *Jour. Foram. Res.* 1997. V. 27. P. 101–122.
7. Polyak L., Korsun S., Febo L.A. et al. Benthic foraminiferal assemblages from

the Southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment // Journal of Foraminiferal Research. 2002. V. 32 (3). P. 252–273.

8. Schmidt C., Geslin E., Bernhard J.M. et al. Deposit-feeding of *Nonionellina labradorica* (foraminifera) from an Arctic methane seep site and possible association with a methanotroph // Biogeosciences. 2022. V. 19. P. 3897–3909.

9. Schönfeld J. The benthic foraminiferal response to the 2004 spring bloom in the western Baltic Sea // Marine Micropaleontology. 2007. V. 65. Is. 1–2. P. 78–95.

10. Seidenkrantz M-S. Benthic foraminifera as palaeo sea-ice indicators in the subarctic realm - examples from the Labrador Sea-Baffin Bay region // Quaternary Science Reviews. 2013. V. 79. P. 135–144.

11. Steinsund P.I., Polyak L., Hald M. et al. Distribution of calcareous benthic foraminifera in recent sediments of the Barents and Kara Sea // Journal Benthic foraminifera in surface sediments of the Barents and Kara Seas: modern and late Quaternary applications. Dr. scient thesis, Univ. Tromsø, Norway. 1994. P. 61–102.

A quantitative analyses of the BF assemblages were carried out, and 6 assemblages were identified that reflect changing environmental conditions in the Cambridge Strait.

**Клювиткина Т.С.¹, Новичкова Е.А.², Козина Н.В.²,
Матуль А.Г.², Мохан Р.³, Тивари М.³**

(¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ³Национальный центр полярных и океанических исследований, Васко-да-Гама, Индия)

Динамика природных условий на юго-западном шельфе Шпицбергена по данным микропалеонтологического анализа

**Klyuvitkina T.S.¹, Novichkova E.A.², Kozina N.V.²,
Matul A.G.², Mohan R.³, Tiwari M.³**

(¹Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow;
²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; National Centre for Polar and Ocean Research, Vasco-da-Gama, India)

Changes of environmental conditions on the southwestern shelf of Spitsbergen based on micropaleontological analysis

Ключевые слова: Гренландское море, палеореконструкции, цисты динофлагеллят, атлантические воды.

В сообщении представлены первые результаты анализа диноцист в осадках колонки АМК-7063. Реконструированы периоды ослабления и интенсификации влияния относительно теплых североатлантических вод в позднем голоцене, предположительно соответствующие Средневековой климатической аномалии и Малому ледниковому периоду.

В последние годы в Арктике наблюдается заметное потепление. Поток теплой атлантической воды на север увеличивается, что приводит к изменениям природных условий как океана, так и прилегающей суши, и нам важно понимать, какими именно будут эти изменения. Поэтому особенно актуальным становится изучение климатических событий прошлого и, в частности, последних столетий и тысячелетий. Ключевым регионом для исследования закономерностей формирования климата Северного полушария считается Норвежско-Гренландский бассейн. Здесь находится зона контакта холодной полярной воды, поступающей из Северного Ледовитого океана на юг с Восточно-Гренландским течением и из Баренцева моря с Восточно-Шпицбергенским, и теплых и соленых вод Норвежского и Западно-Шпицбергенского течений, следующих из Атлантического океана в Арктику. Разные водные массы разделены Полярным и Арктическим фронтами, которые в геологическом прошлом неоднократно меняли свое положение, реагируя на изменения глобального и регионального климата. Подобные изменения приводят к трансформации сообществ морских микроорганизмов, в том числе динофлагеллят как

одного из основных компонентов фитопланктона. Для палеореконструкций гидрологических условий широко используется анализ цист динофлагеллят (диноцист), которые хорошо сохраняются в донных осадках.

Колонка АМК-7063 (76°59.816' с.ш., 13°6.409' в.д.; рис. 1) длиной 30 см получена с помощью мультикорера Mini Muc K/MT 410 в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2021 г.) на юго-западном шельфе Шпицбергена (Гренландское море), на конусе выноса фьорда Хорнсунд с глубины моря 319 м [1] в зоне одновременного действия теплого Западно-Шпицбергенского и холодного Восточно-Шпицбергенского течений.

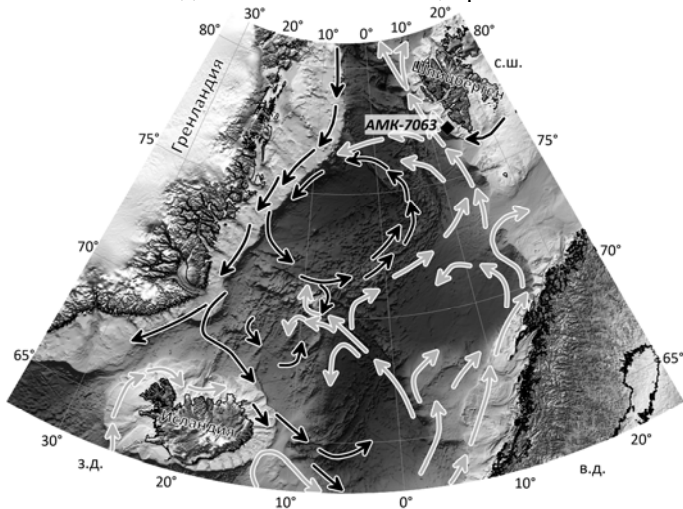


Рис. 1. Местоположение колонки АМК-7063 в Гренландском море на шельфе Шпицбергена. Черными и серыми стрелками показаны холодные и теплые течения соответственно [3, 6].

Осадки колонки представлены, в основном, черным алеврито-пелитовым илом. На глубине 5.5 см методом ускорительной масс-спектрометрии ^{14}C раковины морского моллюска в Лаборатории радиоуглеродных исследований (Познань, Польша) получена одна датировка. Радиоуглеродный возраст был пересчитан в календарный (кал. л.н.) с использованием калибровочной кривой Marine20 [8] с учетом поправки на локальный резервуарный эффект ($\Delta R = -82 \pm 21$) [7]. Максимальный возраст осадков колонки составил 2334 кал. лет согласно модели возраста, созданной при помощи компьютерной программы gbacon 3.0.0 на основе байесовского моделирования [2].

Образцы для целей анализа диноцист отбирались с интервалом 1 см. Всего изучено 28 образцов. Химическая обработка проб выполнена в Институте океанологии имени П.П.Ширшова РАН по стандартной методике [4]. Для растворения карбонатного и силикатного вещества в

осадках использовались соляная (HCl) и фтористоводородная (HF) кислоты. Для удаления из образцов пелитовых частиц препараты фильтровались через сито с диаметром пор 7–10 мкм. Исследования ассоциаций проводились под световым микроскопом с рабочим увеличением $\times 400$. В каждом образце было идентифицировано как минимум 300 диноцист.

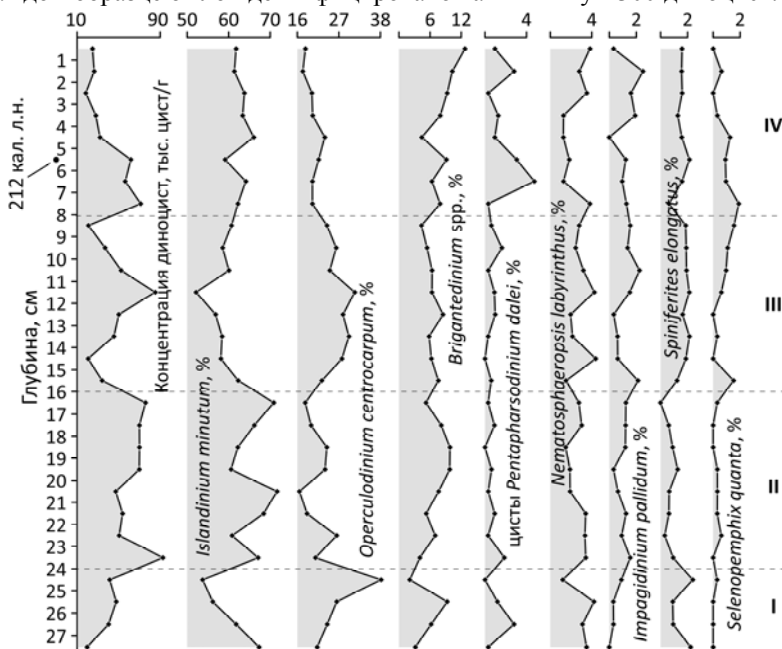


Рис. 2. Концентрации диноцист и процентное содержание индикаторных видов в осадках колонки АМК-7063. На оси Y показан календарный возраст. Римскими цифрами обозначены интервалы, обсуждаемые в тексте.

Концентрации диноцист в осадках колонки АМК-7063 варьируют от 18.3 до 92.6 тыс. цист/г сухого осадка (рис. 2). В составе ассоциаций максимального обилия достигают виды *Islandinium minutum* subsp. *minutum* (52.1–71.7% суммарно со сходными по экологическим характеристикам *Islandinium? cezare* и *Echinidinium karaense*) и *Operculodinium centrocarpum* (16.6–38.2%). Также присутствуют *Brigantedinium* spp. (2.1–12.7%), цисты *Pentaparthosodinium dalei* (0–4.8%), *Nematospaeropsis labyrinthus* (1.2–4.4%), *Impagidinium pallidum* (0–2.5%), *Spiniferites elongatus* (0–2.4%), *Selenopemphix quanta* (0–1.9% суммарно с *Protoperidinium nudum*), *S. ramosus* (0–1.3%), *S. mirabilis* (0–1.2% суммарно с *S. hyperacanthus*) и *Spiniferites* sp. (0–1.2%). Виды с максимальной относительной численностью менее 1% отнесены к редким и представлены *Polykrikos* sp., *Bitectatodinium tepikiense*, *Impagidinium sphaericum* и *Trinovantedinium applanatum*.

Для палеогидрологических реконструкций в данной колонке наиболее показательны вариации относительной численности видов *I. minutum* и *O. centrocarpum*. *I. minutum* – самый распространенный вид в шельфовых морях Арктики, его содержание часто достигает 97%. В районах, где температура поверхностных вод зимой опускается ниже 0°C, а летом ниже 5°C, *I. minutum* отмечается в количествах свыше 10% [10]. *O. centrocarpum* – типичный вид для северо-восточной части Атлантики и Норвежского моря, его присутствие в ассоциациях диноцист служит маркером влияния североатлантических вод [10]. Исследование диноцист в поверхностных осадках у побережья Шпицбергена показало, что четкое различие между районами, находящимися под влиянием атлантических и арктических вод, соответственно, проявляется в смене доминирования *O. centrocarpum* и *I. minutum* и тесно связано с температурой поверхности моря. С удалением к западу от берегов архипелага и с увеличением глубины, по мере того как условия поверхности моря меняются от арктических (холодных, с сезонным морским льдом) к атлантическим (относительно теплым и соленым), ассоциации с доминированием *I. minutum* в поверхностных осадках сменяются ассоциациями с преобладанием *O. centrocarpum* [9].

Также важно отметить присутствие малочисленных, но значимых цист *P. dalei*. Согласно исследованиям диноцист в седиментационных ловушках во фьордах Шпицбергена, а также в поверхностных осадках западной части Баренцева моря, этот вид в данном регионе ассоциируется с арктическими условиями и хорошо стратифицированными водами [5, 9].

По изменениям относительного содержания индикаторных видов диноцист в осадках колонки АМК-7063 предварительно выделяются четыре интервала (см. рис. 2), соответствующие периодам ослабления и интенсификации влияния относительно теплых североатлантических и холодных арктических вод. Осадки в интервале I (28–24 см) и III (16–8 см) отличаются высоким содержанием *O. centrocarpum* (в среднем 27.5% и 26.8% соответственно) и сравнительно низкой долей *I. minutum* (до 59.7% и 58.4%), при этом относительно невысокими концентрациями диноцист. Очевидно, что осадки этих интервалов формировались во время эпизодов повышения температуры и солености поверхностных вод, в условиях усиления поступления североатлантической воды с Западно-Шпицбергенским течением. Осадки интервала III, по-видимому, накапливались в эпоху Средневекового климатического оптимума.

Интервалы II (24–16 см) и IV (8–0 см) характеризуются обратной картиной: здесь возрастает численность *I. minutum* (66.0% и 62.7% соответственно) и снижается *O. centrocarpum* (20.9% и 20.1%). В интервале IV достигает максимума содержание цист *P. dalei* (в среднем 1.8%). Это указывает на усиление влияния холодного Восточно-Шпицбергенского течения, возможное снижение температуры поверхностных вод и появление сезонного льда. Осадки этого интервала, предположительно, накапливались

во время Малого ледникового периода.

Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 25-27-00123, https://rscf.ru/prjcard_int?25-27-00123. Экспедиционные работы проведены с использованием оборудования уникальной научной установки НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Володин В.Д. и др. Системные исследования осадкообразования в Европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663.
2. Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis. 2011. V. 6(3). P. 457–474.
3. Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s // ICES Journal of Marine Science. 2004. V. 61. P. 846–863.
4. de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological Preparation Techniques and Analyses. Notes Prepared for Students of Course SCT 8245. Montréal: Département des Sciences de la Terre, UQAM, 2010. 32 p.
5. Howe J.A., Harland R., Cottier F.R. et al. Dinoflagellate cysts as proxies for palaeoceanographic conditions in Arctic fjords. Geological Society of London, Special Publications. 2010. V. 344. P. 61–74.
6. Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea // Polar Research. 1991. V. 10. P. 5–18.
7. Mangerud J., Gulliksen S. Apparent radiocarbon ages of recent marine shells from Norway, Spitsbergen, and Arctic Canada // Quaternary Research. 1975. V. 5. P. 263–273.
8. Reimer P.J., Austin W., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon. 2020. V. 62. № 4. P. 725–757.
9. Solignac S., Grøsfjeld K., Giraudeau J., de Vernal A. Distribution of modern dinocyst assemblages in the western Barents Sea, Norwegian Journal of Geology, 2009, no. 89, p. 109–119.
10. Zonneveld K.A.F., Marret F., Versteegh G.J.M. et al. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points // Review of Palaeobotany and Palynology. 2013. № 191. P. 1–197.

Based on the micropaleontological study of core AMK-7063, obtained in the southwestern part of the Spitsbergen shelf, the intervals of weakening and intensification of relatively warm North Atlantic waters inflow in the Late Holocene were reconstructed.

Кузьмина В.А., Артемова А.В.

(Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева – ТОИ ДВО РАН, Владивосток, e-mail: kuzmina.va@poi.dvo.ru)

Диатомовые комплексы позднего плейстоцена-голоцена с подводного хребта Ширшова (Берингово море) как индикаторы изменения палеосреды

Kuzmina V.A., Artemova A.V.

(V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok)

Late Pleistocene-Holocene diatom assemblages from the Shirshov Ridge (Bering Sea) as indicators of paleoenvironmental change

Ключевые слова: диатомовые водоросли, голоцен, поздний плейстоцен, Берингово море, хребет Ширшова.

В результате анализа видового состава диатомей из голоцен-позднеплейстоценовых отложений хребта Ширшова выявлены изменения, отражающие смену ледниковых условий к межледниковым. Выделены несколько этапов развития палеосреды, которые различаются температурой, уровнем моря и поступлением питательных веществ.

Хребет Ширшова расположен на пути основных течений Берингова моря, что влияет на процессы поступления питательных веществ и стимулирует биологическую продуктивность данного региона. Это предоставляет уникальные возможности для изучения палеосреды по отложениям микрофоссилий в донных осадках. Диатомовые водоросли, обладая высокой чувствительностью к изменениям окружающей среды, служат надежными индикаторами этих изменений во времени.

Целью данного исследования является реконструкция изменений палеосреды в районе хребта Ширшова в позднем плейстоцене и голоцене на основе анализа состава, количественного распределения диатомовых водорослей, соотнесенного с результатами геохимических и литологического анализов. Материалом для изучения послужила колонка глубоководных осадков LV76-26-2.

Анализ состава диатомей и сопутствующих данных позволил выделить несколько палеоокеанологических этапов.

В позднем плейстоцене, во время последнего ледникового максимума, наблюдались условия низкого уровня моря, приведшие к осушению обширных участков шельфа. Последующее глобальное потепление в конце плейстоцена–раннем голоцене привело к активному таянию ледников и быстрому подъему уровня моря [1]. В этот переходный период делгациии в осадках преобладали процессы интенсивного выноса терригенного материала. Это отразилось в диатомовых комплексах присутствием

переотложенных вымерших видов, таких как *Cosmiodiscus insignis* и *Puxidicula zabelinae*, что свидетельствует об эрозии обнажившихся шельфовых отложений. Также фиксируются пресноводные диатомеи, указывающие на перенос отложений из зоны, на которую оказывал влияние речной сток. Пик *Thalassionema nitzschioides* в этот период может указывать на приток более теплых вод в данный регион, а последующий постепенный рост *Rhizosolenia hebetata* может указывать на установление устойчивой стратификации вод.

В среднем-позднем голоцене произошла наиболее значимая трансформация палеосреды, приведшая к установлению современных океанологических условий. Стабилизация уровня моря и установление устойчивой связи с Тихим океаном отразились на диатомовых комплексах. Обилие спор *Chaetoceros* является индикатором высокой продуктивности [2]. Доминирование *Neodenticula seminae* маркирует усиление притока богатых питательными веществами тихоокеанских вод [3–4]. В комплексе начинают устойчиво присутствовать теплолюбивые виды, такие как *Shionodiscus oestrupii* и *Thalassiosira eccentrica*, при этом полностью исчезают пресноводные и ледовые диатомеи.

Произошедшая трансформация привела к смене режима осадконакопления с преобладания аллохтонного материала к осадконакоплению биогенных компонентов автохтонного происхождения. Установилась высокопродуктивная система, характеризующаяся усилением вертикального перемешивания, стабильным поступлением тихоокеанских вод и длительным вегетационным сезоном, что и сформировало современный диатомовый комплекс над хребтом Ширшова.

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№ 124022100084-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook M.S., Keigwin L.D., Sancetta C.A. The deglacial history of surface and intermediate // Deep-Sea Research Part II: Topical water of the Bering Sea: Studies in Oceanography. 2005. V. 52. Is. 16–18. P. 2163–2173.
2. Katsuki K., Takahashi K. Diatoms as paleoenvironmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the late Quaternary // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2005. V. 52. Is. 16–18. P. 2110–2130.
3. Okazaki Y., Takahashi K., Asahi H. et al. Productivity changes in the Bering Sea during the late Quaternary // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2005. V. 52. Is. 16–18. P. 2150–2162.
4. Miettinen A., Kog N., Husum K. Appearance of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the northern Nordic Seas - An indication of changes in Arctic sea ice and ocean circulation // Marine Micropaleontology. 2013. V. 99. P.

2–7.

An analysis of the diatom species composition from Holocene-Late Pleistocene deposits of the Shirshov Ridge revealed changes reflecting the transition from glacial to interglacial conditions. Several stages in the development of the paleoenvironment were identified, differing in temperature, sea level, and nutrient supply.

Кулешова Л.А., Овсепян Е.А.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: kuleshova.la@atlantic.ocean.ru)

**Бентосные фораминиферы как индикаторы изменчивости
глубоководных условий в юго-западной Атлантике
(возвышенность Риу-Гранди) в интервале последних 300
тыс. лет**

Kuleshova L.A., Ovsepyan E.A.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Benthic Foraminiferal Evidence for Variability of Deep-Water
Conditions in the Southwestern Atlantic (Rio Grande Rise)
during the Last 300 kyr**

Ключевые слова: четвертичные отложения, содержание кислорода, поток органического вещества

По результатам микропалеонтологического анализа глубоководных комплексов бентосных фораминифер в осадках западного склона поднятия Риу-Гранди были реконструированы изменения содержания кислорода в придонных водах и поступления органического вещества на дно в интервале последних трех ледниковых циклов. В целом для района исследования были выявлены умеренно насыщенные кислородом условия и преобладание свежего органического вещества на поверхности осадка на протяжении всего изученного временного интервала.

Бентосные фораминиферы (БФ) — раковинные одноклеточные организмы из группы протистов, обитающие преимущественно в поверхностном слое морских осадков на различных глубинах — являются одним из ключевых индикаторов океанологических условий в прошлом. Высокое таксономическое разнообразие БФ, относительно короткий жизненный цикл и способность сообществ быстро реагировать на изменения условий среды обитания, а также устойчивость многих раковин БФ к растворению — основные факторы, обуславливающие широкое применение этой группы организмов в биостратиграфических и палеоэкологических исследованиях [3, 5].

С целью реконструкции изменений содержания кислорода в глубоководной среде в субтропической области юго-западной Атлантики и поступления органического вещества (ОВ) на дно проведены количественный и качественный микропалеонтологический анализы комплексов БФ в колонке донных осадков АИ-3321 (30°56.85' ю.ш., 38°02.45' з.д., глубина океана 2969 м, длина осадочного разреза 2.93 м). Колонка АИ-3321, отобранная с западного склона возвышенности Риу-Гранди в 2014 году в 46-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Иоффе» [1], вскрыла отложения последних ~300 тыс. лет [4]. В

соответствии с имеющимися в литературе сведениями об экологических предпочтениях видов БФ, все таксоны в колонке АИ-3321 были разделены на группы: по *микроместообитанию* в осадке (эпифауна, поверхностная инфауна, средняя и глубокая инфауна); по степени толерантности к разным диапазонам *содержания кислорода* на границе вода-осадок (оксидную, субоксидную или дизоксидную) и условиям разной *интенсивности потока ОВ* на дно (группы видов — индикаторы высокой или низкой биопродуктивности, и, как следствие, высокого и низкого потока ОВ на дно; виды, потребляющее свежее или преобразованное ОВ).

Во всех образцах исследуемой колонки отмечается доминирование эпифауны в комплексах БФ. Процентное содержание раковин эпифауны превышает долю инфауны, в среднем, в 2,3 раза. Такое соотношение отражает преобладание свежего ОВ на поверхности осадка и также указывает на отсутствие дефицита кислорода у дна на протяжении всего изученного временного интервала [9]. Наиболее многочисленные виды эпифауны — *Epistominella exigua*, *Globocassidulina subglobosa*, *Alabaminella weddellensis*, *Cibicidoides wuellerstorfi*, *Nuttallides umbonifer*, *Osangularielloides rugosus*, *Lobatula lobatula*, *Gyroidinoides polius*, *Cibicidoides mundulus*, *Ioanella tumidula*, *Pyrgo murrhina*, *Pyrgoella irregularis*.

На отсутствие дефицита кислорода у дна указывает малая доля видов дизоксидной группы, максимальные процентные содержания которой (~7–10%) зафиксированы в середине ИКС 7 в интервале 200–220 тыс. лет назад. Субоксидная группа БФ доминирует в колонке в течение почти всего изученного интервала. Ее процентное содержание в среднем составляет 66%. С окончанием последнего оледенения значения данной группы снижаются до 40% за счет увеличения доли оксидной группы, которая при этом достигает более 50%. В целом, кривые распределения первых двух групп являются инверсными по отношению друг к другу. Так, в образцах ледниковых ИКС 6 и 4, где доля оксидной группы минимальна (15–18%), преобладает субоксидная группа БФ с содержанием 80–84%.

Снижение процентного содержания видов, принадлежащих к эпифауне, и одновременное увеличение суммарной доли видов инфауны в начале ИКС 7, ИКС 5 и второй половине ИКС 3 свидетельствует о разнообразии экологических ниш в это время, что, по-видимому, связано с улучшением условий палеосреды для фауны БФ. Этот вывод согласуется с повышенными ($\geq 15\%$) значениями процентного содержания видов-индикаторов высокой продуктивности, таких как *Bulimina elongata*, *Bulimina semicostata*, *Bulimina torta*, *Bulimina truncana*, *Cassidulinoides mexicana*, *Fursenkoina bradyi*, *Fursenkoina complanata*, *Fursenkoina compressa*, *Melonis affinis*, *Pullenia salisburyi*, *Pullenia quinqueloba*.

Преобладание в колонке АИ-3321 низкопродуктивных видов БФ свидетельствует о преимущественно невысоком потоке ОВ в течение

последних ~300 тыс. лет. Снижение их доли в сообществе до 8% в ИКС 4 наряду с уменьшением процентного содержания высокопродуктивных видов с окончанием ИКС 5 указывает на общее ухудшение условий обитания БФ вблизи дна. Следует отметить, что стадия ИКС 4 характеризуется увеличением популяции БФ, виды которой питаются свежим лабильным ОВ. Высокая доля данной группы видов также наблюдается в ИКС 8, середине – конце ИКС 7 и в ИКС 6, главным образом, за счет массового развития вида-оппортуниста *E. exigua*, который является индикатором сезонного поступления ОВ [8].

С одной стороны, низкий поток свежего органического вещества мог быть обусловлен низкой продукцией фитопланктона в фотическом слое вследствие дефицита биогенных элементов. Действительно, удаленное положение района исследования от океанских (зон апвеллинга) и континентальных (устьев рек и областей устойчивых ветровых потоков) источников биогенных элементов, может объяснить в целом низкую биологическую продуктивность над возвышенностью Риу-Гранди в течение среднего плейстоцена – голоцена. С другой стороны, литологические, гранулометрические, биостратиграфические данные по этой и соседним [2, 6, 7] колонкам подтверждают активное воздействие придонных течений на процессы осадконакопления, поэтому часть вертикально осаждаемого органического вещества могла вымываться из осадка при высоких скоростях течений. Для отдельных интервалов в пределах ИКС 8–7, а также во второй половине ИКС 5 и 3 закономерно предположить влияние придонных течений на привнос деградированного ОВ, судя по несколько повышенному содержанию группы видов-индикаторов присутствия в осадке измененного ОВ, подвергшегося процессу преобразования бактериями.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Е.В., Мурдмаа И.О., Борисов Д.Г. и др. Изучение контуритовых систем Южной Атлантики в 46-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Иоффе» // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 5. С. 827–829.
2. Овсепян Е.А., Гречихина Н.О. Плейстоценовые океанологические условия в районе дрефта Иоффе (Южная Атлантика) по комплексам бентосных фораминифер // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 1. С. 108–123.
3. Gooday A.J. Benthic foraminifera (Protista) as tools in deep-water palaeoceanography: Environmental influences on faunal characteristics // *Advances in Marine Biology*. 2003. V. 46. P. 1–90.
4. Ivanova E.V., Borisov D.G., Murdmaa I.O. et al. Contourite systems around the northern exit from the Vema Channel // *Marine Geology*. 2022. V. 449.

106835.

5. Jorissen F.J., Fontanier C., Thomas E. Paleoceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics // Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography. V. 1. Developments in Marine Geology / Hillaire-Marcel C., de Vernal A. (Eds.). New York: Elsevier, 2007. P. 263–325.
6. Ledbetter M.T. A late Pleistocene time-series of bottom-current speed in the Vema Channel // Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology. 1986. V. 53. № 1. P. 97–105.
7. Murdmaa I., Ivanova E., Borisov D. History of the Ioffe Drift // The Ioffe Drift / Murdmaa I.O., Ivanova E.V. (Eds.). Springer, Switzerland, 2021. P. 161–182.
8. Smart C.W., Waelbroeck C., Michel E., Mazaud A. Benthic foraminiferal abundance and stable isotope changes in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the last 20 kyr: Paleoceanographic implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2010. V. 297. P. 537–548.
9. Van der Zwaan G.J., Duijnste I.A.P., Den Dulk M. et al. Benthic foraminifers: proxies or problems? A review of paleoecological concepts // Earth Sciences Reviews. 1999. V. 46. P. 213–236.

Micropaleontological analysis of deep-sea benthic foraminiferal assemblages from sediments on the western slope of the Rio Grande Rise provides a reconstruction of bottom-water oxygenation and organic matter flux to the seafloor over the last three glacial cycles. The results indicate persistently moderately oxygenated conditions and a sustained predominance of fresh organic matter at the sediment surface throughout the studied interval.

**Левитан М.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В.,
Сыромятников К.В.**

(Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва,
e-mail: m-levitan@mail.ru)

**Сопоставление геохимических особенностей
плейстоценовых отложений Индийского, Атлантического и
Тихого океанов**

**Levitan M.A., Domaratskaya L.G., Koltsova A.V.,
Syromyatnikov K.V.**

(Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow)

**Comparison of geochemical peculiarities of Pleistocene
sediments from the Indian, Atlantic and Pacific oceans**

Ключевые слова: донные осадки, плейстоцен, геохимия, Атлантика, Индийский океан, Тихий океан

Проведен сравнительный анализ таких геохимических особенностей плейстоценовых отложений как химический состав их основных типов, средний химический состав плейстоцена основных океанических бассейнов, средневзвешенный химический состав, абсолютные массы оксидов петрогенных элементов. Выявлено влияние ряда экзогенных и эндогенных факторов на межбассейновое фракционирование в это время.

Международный проект глубоководного бурения заложил основу для изучения межбассейнового фракционирования Мирового океана в плейстоценовое время. Авторами предпринята попытка такого исследования на основе данных по геохимическим особенностям плейстоценовых отложений, изложенных ранее в наших статьях по Индийскому океану [1], Атлантике [2] и Тихому океану [3]. В указанных публикациях в качестве нижней возрастной границы плейстоцена использовался рубеж 1.8 млн. лет (округленно). В них же перечислены источники использованных данных по химическому составу изучавшихся осадков.

В качестве основного методического приема проделанного исследования использовалось построение спайдерграм отношений химических составов основных типов плейстоценовых отложений Атлантики и Пацифики, их средневзвешенных химических составов и абсолютных масс по отношению к тем же параметрам для плейстоценовых отложений Индийского океана. По нескольким критериям определялся состав петрофонда питающих провинций для изученных осадков. Рассчитаны средние арифметические величины химического состава плейстоценовой толщи отдельных океанов (по оксидам петрогенных элементов). Нельзя не отметить, что плейстоценовые отложения в южной

половине Тихого океана изучены глубоководным бурением гораздо хуже, чем в северной его части.

Пелагические глины Атлантики заметно обогащены по сравнению с Индийским океаном такими химическими компонентами как Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , P_2O_5 . Существенное обеднение выявлено для Ni , Cu , Zn и Ba . SiO_2 , TiO_2 , MnO , MgO , Na_2O ; V , Cr , Co и Zr в пелагических глинах обоих океанов находятся в близких содержаниях. По сравнению с пелагическими глинами плейстоцена Индийского океана соответствующие отложения Пацифики заметно обогащены Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , Cu , Rb и Zr . Слабое обогащение отмечается для MgO , CaO , V . Существенное обеднение выявлено для MnO . Содержания таких компонентов как SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , P_2O_5 , Sc , V , Cr , Co , Ni , Zn , Ga , Sr и Ba достаточно близки. В целом можно сделать вывод о том, что по своему среднему арифметическому химическому составу пелагические глины плейстоцена Атлантики и Пацифики довольно похожи, за исключением MnO , CaO , K_2O , Cu , Zn . Пелагические глины Индийского океана богаче однотипных тихоокеанских отложений La и Ce , беднее – Sm и Eu ; в Атлантике они обеднены РЗЭ по сравнению с Индийским и Тихим океанами (за исключением Ce).

Гемипелагические глины в Атлантическом океане по сравнению с такими же отложениями Индийского океана обогащены CaO , Na_2O , P_2O_5 и Be . Осадки Атлантики обеднены TiO_2 и MnO . Довольно близки в обоих океанах содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Cr , Co , Ni и Y . Гемипелагические глины плейстоцена Пацифики обогащены Al_2O_3 , Na_2O , V , Ni и Be по отношению к однотипным осадкам Индийского океана. В то же время они обеднены TiO_2 и CaO . Содержания таких химических компонентов как Fe_2O_3 , MnO , MgO , K_2O , P_2O_5 , Cr , Co и Zr в осадках сравниваемых океанов достаточно похожи. Сопоставление гемипелагических глин плейстоцена Тихого и Атлантического океанов выявило, что в Пацифике наблюдается обогащение SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , V , Ni , Cu и Ba , а обеднение – CaO , P_2O_5 и Zr . Осадки обоих океанов довольно близки по содержаниям TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , K_2O , Li , Cr и Co . Состав РЗЭ в гемипелагических глинах гораздо ближе к ПААС, чем в пелагических глинах. Особенности химического состава гемипелагических глин Тихого океана позволяют рассматривать их в качестве разновидности вулканотерригенных образований.

В основе океанских глин лежит абиогенная (существенно терригенная) матрица, а их главные литолого-фациальные типы явно отличаются по своей геохимии (прежде всего, за счет присутствия заметного количества водородного вещества в пелагических глинах, что обусловлено процессами фазовой дифференциации).

Терригенные турбидиты Атлантического и Индийского океанов очень похожи по своему химическому составу. Терригенные плейстоценовые отложения турбидитов Пацифики по сравнению с такими же турбидитами

Индийского и Атлантического океанов заметно выделяются сильным обогащением SiO_2 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O и Sr. Они сильно обеднены MgO и CaO.

Планктоногенные карбонатные осадки (кокколитовые и кокколито-фораминиферовые) Атлантики и Индийского океана близки по своему составу. Однотипные отложения Пацифики выделяются явным обогащением MnO.

Диатомовые илы и глины Тихого и Индийского океанов имеют почти одинаковые содержания SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, P_2O_5 , V, Cr, Co. Обогащение тихоокеанских отложений рассматриваемого типа по сравнению с Индийским океаном отмечено для Al_2O_3 , Na_2O , K_2O и Ni, а обеднение какими-либо химическими компонентами не выявлено. В нашей базе данных по Атлантике состав этого типа осадков представлен лишь анализами для отложений Бенгельского апвеллинга.

Диатомово-радиоляриевые илы и глины Тихого и Индийского океанов по своим геохимическим характеристикам очень похожи: содержания таких компонентов как SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 и ППП (потеря при прокаливании); Cr, Co и Zn почти одинаковы. Тихоокеанские отложения этого типа обогащены MgO, Li, Ni, Cu и ни одним из рассмотренных нами компонентов не обеднены.

На примере плейстоцена Тихого океана показано, что гидротермальные отложения разительно отличаются по своему составу от “фоновых” осадочных образований того же возраста. Особенно наглядно это видно по величинам ЖМ (железного модуля). Такая специфика обусловлена совершенно различными источниками вещества, температурами и способами транспортировки, условиями аккумуляции. Причиной этого отличия является принципиально разная геодинамическая обстановка с доминированием спрединговых и внутриплитных проявлений эндогенной активности в случае гидротермальных отложений и существенно экзогенных процессов для “фоновых” осадков.

В петрофонде питающих провинций водосборов преобладает материал среднего или смешанного состава, а вещество основного или кислого состава играет подчиненную роль.

Средние содержания SiO_2 , TiO_2 и K_2O в плейстоценовых осадках ряда: Атлантический, Индийский, Тихий океаны находятся в прямо пропорциональной зависимости от отношения площадей дна ниже поверхности современной критической глубины к площадям современных океанских бассейнов (100S/L) в том же ряду.

Для плейстоцена была характерна прямо пропорциональная зависимость в указанном ряду океанов между средними содержаниями MgO, CaO, P_2O_5 и абсолютными массами CaCO_3 . Такая же зависимость отмечена и для отношения площадей дна выше поверхности современной критической глубины к площадям современных океанских бассейнов [$100(\text{L}-\text{S})/\text{L}$] в

современный период времени. Одинаковой закономерности – понижения значений от Атлантики к Индийскому океану и дальнейшего резкого повышения к Пацифике – придерживаются средние содержания в плейстоценовых осадках Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Na_2O и площади (L) рассматриваемых современных океанских бассейнов.

Средневзвешенный химический состав (в 10^{18} г) для пелагических и, с некоторыми исключениями, для гемипелагических глин уменьшается в ряду океанов: Атлантический – Индийский – Тихий, что связано с сочетанием влияния отношений В/Л, климата и геодинамики континентальных окраин. По уменьшению величин средневзвешенного химического состава для терригенных турбидитов четко проявлен другой ряд океанов: Индийский – Атлантический – Тихий. Это обусловлено распределением средневзвешенного литологического состава.

Для плейстоценовых планктоногенных карбонатных отложений существует такой же ряд уменьшения величин средневзвешенного химического состава, как и для глинистых осадков: Атлантический – Индийский – Тихий океаны. В Тихом и Индийском океанах величины средневзвешенного химического состава для планктоногенных кремнистых отложений очень близки (отдельно для диатомовых и отдельно для радиоляриево-диатомовых осадков), что указывает на фациальный контроль этого параметра первичной продукцией и условиями дивергенций.

Сравнение абсолютных масс химических компонентов в основных типах плейстоценовых отложений всех главных океанов показало, что в принципе (за исключением гемипелагических глин Тихого океана) в разных океанах эти величины для одинаковых отложений довольно близки, с некоторым преимуществом Атлантики (из-за отношения В/Л). Весьма значительное преобладание абсолютных масс гемипелагических глин Тихого океана над этим же параметром в Индийском и Атлантическом океанах обусловлено, прежде всего, огромными скоростями эрозии на неотектонических поясах горообразования, расположенными на водосборах окружающих с востока, севера и запада Пацифику континентов, особенно на активных континентальных окраинах.

Массы сухого вещества терригенных турбидитов явно преобладают в плейстоцене Тихого океана, где площади их распространения гораздо меньше, чем в Индийском океане и в Атлантике. Это обусловлено различиями в строении и истории развития континентальных окраин.

С помощью изучения химического состава плейстоценовых отложений удалось частично установить специфику межбассейнового фракционирования в Мировом океане и определить набор основных факторов, отвечающих в каждом из рассмотренных океанов за выявленные геохимические особенности. Вероятно, самым важным параметром, определяющим литолого-геохимическую характеристику межбассейнового фракционирования в плейстоценовое время, являлось положение

поверхности критической глубины. Размер бассейна седиментации во многом определял степень фазовой дифференциации в нем. Таким образом можно сделать вывод об очень важной роли эндогенных процессов (тектонических и магматических) в формировании межбассейнового фракционирования за счет образования и развития самих океанических бассейнов, их континентальных окраин и рельефа дна океанов.

Серия созданных эталонов химического состава основных типов плейстоценовых отложений океанов вносит определенный вклад в учение о химическом составе земной коры и позволяет использовать их для сравнительного анализа с предположительно океанскими осадочными породами в разрезах материков.

Работа выполнена по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) № FMMZ-2024-0028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г. и др. Химический состав плейстоценовых отложений Индийского океана // Литология и полез. ископаемые. 2023. № 5. С. 423–444.
2. Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Атлантического океана // Литология и полез. ископаемые. 2024. № 3. С. 279–300.
3. Левитан М.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Тихого океана // Литология и полез. ископаемые. 2025. № 3. С. 245–272.
4. Левитан М.А. Плейстоценовые отложения Мирового океана. М.: РАН, 2021. 408 с.

Results of comparative analysis of such geochemical peculiarities for Pleistocene sediments as chemical composition of their main types, mean chemical composition of Pleistocene sediments from individual ocean basins, mean weighted chemical composition, mass accumulation rates of oxides of main elements are presented. We managed to reveal the influence of a number of exogenic and endogenic factors for interbasin fractionation in Pleistocene.

Левицкий В.И., Левицкий И.В.

(Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: vlevit@igc.irk.ru)

Палеорекострукции осадочных пород в метаморфических комплексах докембрия-фанерозоя Фенноскандинавского и Сибирского кратонов, Памира

Levitskiy V.I., Levitskiy I.V.

(Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk)

Paleoreconstructions of sedimentary rocks in Precambrian-Phanerozoic metamorphic complexes of the Fennoscandian and Siberian cratons, Pamirs

Ключевые слова: палеорекострукции, осадочных, метаморфических, протолитов, архей-фанерозой, комплексов, Сибирский, Фенноскандинавский, Памир.

Проведены палеорекострукции и петрогеохимические корреляции метаосадочных пород в архейско-фанерозойских комплексах Сибирского и Фенноскандинавского кратонов, подвижных поясах их обрамления, Памира. Их протолитами во всех структурах были древние тоналит-трондьемит-гранодиоритовые ассоциации (ТТГа).

В Сибирском кратоне метаосадочные породы присутствуют в архейско-палеопротерозойских Онотском и Таргазойском зеленокаменных поясах (ОЗП и ТЗП), шарыжалгайском, китойском, канском гранулитовых комплексах, черемшанской свите. В ОЗП и ТЗП распространены кварциты, гнейсы, сланцы. Встречаются мраморы ($\pm\text{До}$, $\pm\text{Ка}$). Возраст детритовых цирконов составляет 2.8–3.35 млрд. лет [8], метаосадочных пород – 2.67–2.89 млн. лет, седиментации – ≈ 2.7 млрд. лет. В гранулитовом китойском комплексе доля силикатных метаосадков – 45–55%, карбонатных – 15–20% ее объема. Распространены детритовые цирконы с возрастaми 3.0–3.2 млрд. лет. Возрастa осадкообразования (по монациту, U–Pb метод) – 2.493 млрд. лет, метаморфизма (по минералам) – 1.9–2.4 млрд. лет.

В шарыжалгайском гранулитовом комплексе доминируют высоко- и низкоглиноземистые гнейсы, реже встречаются мраморы, кальцифиры и кварциты. Модельные возрастa варьируют $[\text{T}_{\text{Nd}}(\text{DM})]$ – 2.4–3.55 млрд. лет, а $[\text{T}_{\text{Hf}}^{\text{C}}(\text{DM})]$ – 2.0–4.1 млрд. лет. Возраст детритовых цирконов составляет 2.74–3.7 млрд. лет [8]. Отмечено 2 рубежа гранулитового метаморфизма 2.4–2.56 и 1.86–1.9 млрд. лет. В парагнейсовой черемшанской свите доля мраморов – 15–20%, метаосадочных алюмосиликатных пород – 55–60%. Модельный возраст гнейсов $[\text{T}_{\text{Nd}}(\text{DM})]$ – мезоархейский (3.0 млрд. лет)].

В Енисейском кряже метаосадочные породы (гнейсы, глиноземистые гнейсы) присутствуют в кузеевской и атамановской свитах канского гранулитового комплекса. Возраст циркона гнейсов 1832–3221 млн. лет.

В Фенноскандинавском кратоне метаосадочные породы распространены

в гранулитовых беломорском, кольском, лапландском и зональном свекофенском комплексах. В кольском – присутствуют метавулканогенные, метатерригенные, метавулканогенно-террегенные породы. Модельные возраста протолитов составляют – 3.4–3.6 млрд. лет. В высокоглиноземистых сланцах отмечаются детритовые цирконы с дискордантным возрастом ядер 2816–2871 млн. лет и, реже, 3.6 млрд. лет. Возраст метаморфизма гнейсов (U-Pb метод) – 2707–2740 млн. лет. В Беломорском подвижном поясе (БПП) доля метаосадочных пород 20% [5]. Они представлены метаморфизованными гнейсами и плагиогнейсами. По Sm-Nd изотопным данным в БПП субстрат гнейсов имеет возраст не древнее 3000 млн. лет, период формирования метаосадков Чупинского надвига 2.82–2.9 млрд. лет [5]. В Лапландском поясе в переслаивании с кальцифирами и мраморами присутствуют метаосадочные породы, обогащенные кварцем – кислые гранулиты. Глиноземистые гнейсы, ассоциирующие с ними, имеют Sm-Nd модельные возраста 2.82–2.88 млрд. лет. Накопление осадочных протолитов происходило в интервале 1.93–2.0 млрд. лет с верхней границей метаморфизма 1.90–1.92 млрд. лет. В Свекофенском поясе присутствуют пара- и ортоамфиболиты, парагнейсы, графитистые сланцы, мраморы, кварциты. Возраст пород сортавальской свиты – 1.95–1.97 млн. лет [5].

Комплексы подвижных поясов обрамления Сибирского кратона – слюдянский, ольхонский, святоносский (баргузинский), барбитайский (алхадырский). Доля карбонатных пород в них достигает 50%. Они метаморфизованы в условиях от гранулитовой до зеленосланцевой фаций. В слюдянском – распространены метаосадочные и метаматматические гнейсы, сланцы, кальцифиры, мономинеральные кварциты и породы смешанных составов [1]. В хангарульском комплексе присутствуют кристаллосланцы и гнейсы, мраморы и кальцифиры, встречаются мономинеральные, апатитовые, магнетитовые, марганцевые кварциты [1]. В хамардабанском комплексе породы корниловской свиты филлитовидные сланцы, а в шубутуйской – грубообломочные породы. Возраст детритовых цирконов метатерригенных сланцев хамардабанской серии – 612–716 млн. лет, а метаморфизма – 480–495 млн. лет. В ольхонском комплексе (Юго-Западное Прибайкалье) распространены плагиосланцы, гнейсы, амфиболиты, мраморы, кальцифиры, кварциты. В гнейсах встречены ядра детритовых цирконов с возрастными ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 2488 и 2753 млн. лет. Такие датировки встречаются в цирконах гнейсов и сланцев гранулитовой фации шарыжалгайского комплекса [8]. Возраст протолитов ольхонского комплекса оценивается – 535–840 млн. лет, метаморфизма гранулитовой фации – 498–507 млн. лет [2]. Барбитайский (алхадырский) комплекс (свита) слагает Алхадырский террейн Кукшери-Ийского прогиба Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), примыкающего к Бирюсинской глыбе Присаянского выступа фундамента Сибирского

кратона. Среди метаосадочных пород распространены, кальцитовые мраморы, реже присутствуют доломитовые, плагиосланцы и гнейсы. Модельный возраст $T_{Nd}(DM)$ составляет 1680–1883 млн. лет. Породы барбитайского комплекса метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации повышенных давлений. Возраст метаморфизма – 600 млн. лет, магматизма – 450 млн. лет. В святоносском комплексе отмечаются плагиосланцы и гнейсы, известково-силикатные сланцы, мраморы, карбонатные и кварциты, мраморы. Возраст секущих святоносский комплекс гранитов и сиенитов варьирует 285–305 млн. лет.

Комплексы Памира. Докембрийские ваханский комплекс Бадахшанского кристаллического массива Ю–З Памира включает породы горанской, шахдаринской серий, хорогский ортокотплекс. В ваханском комплексе распространены метаосадочные породы – кварциты, кварцитогнейсы, гнейсы и сланцы, мраморы, кальцифиры. Возраст Бадахшанского массива $\approx$ 1.8–3.0 млрд. лет. Музкольский комплекс Ю–В Памира приурочен к периферии Бадахшанского массива. Метаосадочные породы представлены гнейсами, сланцами, распространены – мраморы, кальцифиры, кварцитогнейсы, мономинеральные и железистые кварциты. Возраст секущих музкольский комплекс гранитов Шатпутского купола U-Pb 527 млн. лет и проявление метаморфизма – 20 млн лет [3].

Палеорекопструкция метаосадков пород Фенноскандинавского и Сибирского кратонов, в комплексах подвижных поясов последнего, в Бадахшанском массиве и музкольском проведены по параметрам **b** и **a** с учетом характеристик (**s, m, f, t, n, k**) [4].

В докембрийских и фанерозойских комплексах Сибири, С–З России, Памира выявлена близкая распространенность не зрелых и зрелых категорий осадков в комплексах Фенноскандинавского и Сибирского кратонов, поясах его обрамления, Ю–З и Ю–В Памира. В архейских, палеопротерозойских и фанерозойских метаморфических комплексах установлены близкие соотношения в них обломочных (не зрелых) и зрелых метаосадочных типов пород, продуктов их химических преобразований. Наиболее широко распространены – алевролиты, алевропелитовые и пелитовые аргиллиты, которые использованы для наших построений. Псаммитолиты, субсиалиты, сиалиты, особенно латериты – редки.

Во всех комплексах Сибирского кратона, как и Фенноскандинавского, подвижных поясах обрамления Сибирского кратона, докембрия и фанеророза Памира наиболее широко распространены алевропелитовые и пелитовые аргиллиты. Именно они послужили основой для проведения палеорекопструкций. Мономиктовые, олигомиктовые, полимиктовые псаммитолиты и особенно субсиалиты, сиалиты и особенно латериты редки.

Питающие провинции метаосадочных пород. Для установления их возможных протолитов были использованы средние значения величин **a** [4], рассчитанных в комплексах отдельно для каждой группы зрелых (рисунок)

метаосадков (алевролитов, алевропелитовых и пелитовых аргиллитов). Именно эти зрелые фракции пользуются наиболее широким распространением во всех изученных комплексах. Их тонкие (зрелые) фракции достоверно отражают состав протолитов (питающих провинций, областей сноса). Для комплексов Сибирского и Фенноскандинавского кратонов, подвижных поясов обрамления Сибирского кратона, ваханского и музкольского комплексов Памира, канского – Енисейского кряжа линии содержаний петрогенных и редких элементов на спайдер-диаграммах реконструируемых как алевропелитовые аргиллиты (рис.), лежат в пределах содержаний ТТГа [7, 9] и архейских толеитов ТН–1 [6]. Линии концентраций редких элементов имеют симбатный характер с положительными пиками для Rb, Ba, Sr, F, Zr и триады La, Ce, Nd, минимумами – Li, Cs, Be, Mo, Yb, Pb (рисунок, линии 1–5). Линии содержаний Cu, Cr, V, Ni, Co, Sc на спайдер-диаграммах могут находиться за пределами их значений в ТТГа [7] и архейских толеитах ТН–1 [6]. В отдельных комплексах отмечается существенное обогащение этими элементами протолитов осадочных пород, что отражается в наследовании в линиях содержаний петрогеохимических характеристик замещаемых магматитов (рисунок). Это обусловлено участием в качестве питающих провинций пород, в разных комплексах варьирующих по составу от калиевых гранитоидов (с обогащением K, Ba, Sr, TR, Zr, Pb, Mo, Sn), до основных и ультраосновных разностей (с накоплением Cu, Cr, Ni, Co, Sc; рис.). Для Zn характерны повышенные содержания в комплексах Сибирского кратона, его обрамления и канского комплекса Енисейского кряжа (рисунок, линии 1, 3, 4).

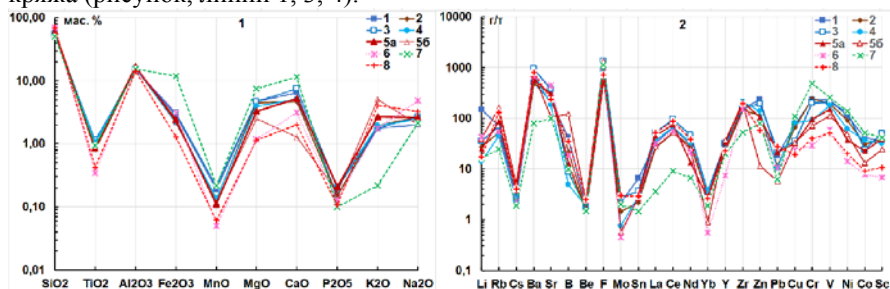


Рисунок. Распределение петрогенных (1) и редких элементов (2) на спайдер-диаграммах в алевропелитовых аргиллитах.

Породы комплексов: Сибирского (1) и Фенноскандинавского (2) кратонов; подвижных поясов в обрамлении Сибирского (3); канского – Енисейского кряжа (4); Памира – ваханского (5а) и музкольского (5б); архейские ТТГа [7]; архейские толеиты ТН–1 [6]; 8 – калишпатовые мезо-, неорхейские гранитоиды (наши данные).

Выполненные исследования указывают на то, что массивы ТТГа в архее

– фанерозое являлись главными питающими провинциями в комплексах докембрия-фанерозоя Сибирского и Фенноскандинавского кратонов, Памира. Протолитами являлись и массивы калишпатовых гранитоидов, основных и ультраосновных пород. По нашему мнению, безусловным, является участие материала ТТГа в составе осадочных пород современных морей и океанов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по базовому проекту № 0284–2021–0007 с использованием оборудования ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Е.П., Резницкий Л.З., Вишняков В.Н., Некрасова Е.А. Слюдянский кристаллический комплекс. Новосибирск: Наука, 1981. 195 с.
2. Гладkochуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С. и др. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. 2010. 51. № 5. С. 571–588.
3. Горохов И.М., Дюфур М.С., Неймарк Л.А. и др. Раннепалеозойские фрагменты Гондваны в покровах Центрального Памира и низких Гималаев: геохимические и изотопные характеристики // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1993. Т 1. № 3. С. 20–34.
4. Неелов А.Н. Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканических пород. Л.: Наука, 1980. 100 с.
5. Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
6. Condie K. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales // Chemical Geology. 1993. V. 104. P. 1–37.
7. Martin H. Archean grey gneisses and the genesis of continental crust. Amsterdam: Elsevier. 1994. P. 205–259.
8. Poller U., Gladkochub D.P., Donskaya T.V. et al. Timing of Early Proterozoic magmatism along the Southern margin of the Siberian Craton (Kitoy area) // Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences. 2004. V. 95. P. 215–225.
9. Trondhjemites, dacites, and related rocks. Elsevier Scientific Publishing Company. 1979. 659 p.

Paleoreconstructions and petrogeochemical correlations of meta-sedimentary rocks in the Archean-Phanerozoic complexes of the Siberian and Fennoscandian cratons, mobile belts of their framing, and the Pamirs have been carried out. Their protoliths in all structures were the ancient tonalite-trondjemite-granodiorite associations (TTGa).

**Ломакина У.С.¹, Яковишина Е.В.¹, Яковishин С.Ю.¹,
Бордунов С.И.^{1,2}**

(¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: ulmk2002@gmail.com;

²Геологический институт РАН, г. Москва)

Реконструкция питающих провинций для отложений нижнего мела Северо-Западного Кавказа

**Lomakina U.S.¹, Yakovishina E.V.¹, Yakovishin S.Yu.¹,
Bordunov S.I.^{1,2}**

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Geological Institute RAS, Moscow)

Reconstruction of the sources provinces for the Lower Cretaceous deposits of the North-Western Caucasus

Ключевые слова: Кавказ, нижний мел, литология, источники сноса, палеобстановки.

В рамках работы проведена реконструкция питающих провинций для нижнемеловых отложений Северо-Западного Кавказа. Установлено, что основной источник сноса располагался на территории Скифской плиты в северо-восточном направлении. В юго-восточном направлении существовал второй источник сноса – в районе Большого Кавказа.

В Северо-Западном сегменте Кавказа среди отложений раннемелового возраста широко распространены терригенные породы. Объект исследований расположен в междуречье рек Абин и Убин Краснодарского края (рис. 1). Нижнемеловые отложения рассматриваемого региона представляют особый интерес в связи с их нефтегазоносным потенциалом. Несмотря на хорошую изученность района, многие аспекты касательно палеобстановок, условий седиментации остаются дискуссионными [1–4].



Рис. 1. Фрагмент геологической карты Северо-Западного Кавказа, по [5], с изменениями. Красный прямоугольник – расположение района исследований.

Нижнемеловые отложения северо-западного Кавказа характеризуются достаточно выдержанным составом: это преимущественно глинистые отложения с сидеритовыми конкрециями, с прослоями алевролитов и песчаников [6]. Базальная толща мела отражает следы активизации тектонического режима, о чем говорит грубый по размерности и разнообразный состав обломочных пород. Начало каждой свиты маркируется в основном песчаной толщей с прослоями конгломератов, что также может указывать на смену тектонического режима или влияние эвстатических изменений уровня моря.

Исследования в данной работе ориентированы на выяснение условий седиментации и природы источников сноса обломочного материала, их минералогического состава, а главное их положения относительно бассейна осадконакопления [7–9]. Для этого было проведено детальное минералогическое исследование прозрачных шлифов, по полученным соотношениям построены классификационные генетические диаграммы Шутова [10] и дискриминантные диаграммы Диккенсона [11, 12].

Анализ вещественного состава песчаных пород проводился на основе петрографического описания шлифов, изготовленных из 93 образцов [13, 14]. Шлифы изучены под микроскопом «Zeiss Lab. A1» на кафедре региональной геологии и истории Земли МГУ им. М.В. Ломоносова.

В рамках работы было проведено детальное литологическое описание пород и определен минералогический состав песчаников для запорожского горизонта (K_{1zp}), горизонта дерби (K_{1db}), солодкинского горизонта (K_{1sl}), шишанской свиты ($K_{1šš}$), фанарского горизонта (K_{1fn}), афипской свиты (K_{1af}) и убинской свиты (K_{1ub}). На классификационных диаграммах Шутова состав песчаников преимущественно имеет мезомиктовый и олигомиктовый состав. Среднее количество кварца около 60%, литокластов 20% и полевых шпатов – 20%. В составе литокластов преобладают метаморфические породы (микро- и средне кристаллические кварциты и кварц-сланцы). Встречаются отдельные обломки верхнеюрских карбонатов, а также глинистых сланцев, песчаников и глин. Магматические обломки представлены литокластами гранитов, основных и средних эффузивов. Окатанность обломков с основным плохая или средняя, что может говорить о близости источников сноса. Также наблюдается тенденция увеличения количества кварца в шлифах с востока на запад. Цемент в породе преимущественно глинистый поровый и пленочный до глинисто-карбонатного, цемента в среднем до 15–20% от объема породы. Отмечаются породы с регенерационным кварцевым цементом и цементацией вдавливания. Среди аксессуарных минералов обнаружены цирконы, турмалины, апатиты, реже сфен, апатит. Присутствуют хромшпинелиды. Стоит отметить отсутствие темноцветных минералов: пироксен встречен в качестве аксессуарного минерала. Обнаружены единичные зерна глауконита (вероятно, переотложенного). Рудная фаза

представлена в единичных случаях магнетитом и чаще пиритом.

Обстановка осадконакопления и источники питающих провинций.

В начале берриаса (запорожский горизонт) обстановка осадконакопления соответствует морским обстановкам с активной гидродинамикой. На это указывают наличие крупнообломочного материала, большое количество литокластов различных по генезису, плохая окатанность зерен. Плохая окатанность материала свидетельствует о относительной близости источника сноса. Распределение составов пород неравномерное, что может указывать на неоднократное переотложение материала. Состав песчаников по Дикинсону отражает обстановки рециклированных (переотложенных) кварцсодержащих комплексов.

В начале валанжина (горизонт дерби) наблюдается трансгрессивный этап, на это указывает увеличение кварцсодержащей компоненты в составе пород снизу-вверх по разрезу. Средняя окатанность литокластов по сравнению с запорожским горизонтом, может указывать о постепенном удалении источника-сноса. Дискриминантная диаграмма Диккинсона показала, что песчаники тяготеют к обстановкам рециклированных кварцсодержащих комплексов и смешанных областей. Из этого можно сделать вывод, что, вероятно, источником сноса была Скифская плита.

В позднем готериве (солонкинский горизонт) процесс седиментации происходил в условиях мелкого моря со слабой гидродинамической активностью. Состав обломочного материала указывает на несколько источников сноса: плохо окатанные магматические литокласты поступали с орогенно-складчатой постройки Большого Кавказа, а хорошо окатанные метаморфические разности – со стороны Скифской плиты или выступов древних комплексов. Данные диаграммы Диккинсона подтверждают смешанный генезис обломочного материала с преобладанием влияния рециклированных комплексов и в единичных образцах о кратонных или переходных континентальных и островодужных обстановках.

К концу готерива (шишанская свита) обстановки осадконакопления сменились на прибрежно-мелководные со спокойным гидродинамическим режимом. Преобладание плохо сортированного и слабо окатанного метаморфического материала, а также состав песчаников по диаграмме Диккинсона (поля рециклированных областей и внутреннего кратона) свидетельствуют о близко расположенном платформенном источнике сноса, вероятно Скифской плите.

В начале баррема (фанарский горизонт) седиментация происходила в мелководном морском бассейне с переменной гидродинамикой. Пестрый состав обломочного материала указывает на несколько источников сноса: Скифская плита поставляла метаморфический материал (кварц-сланцы, кварциты), а более близкий источник в области Большого Кавказа - плохо окатанные магматические обломки и обломки вулканогенной природы. Данные по диаграммам Диккинсона подтверждают смешанный

состав сносимый с рециклированных (платформенных) и переходных континентальных (орогенных) комплексов.

Для афипской свиты (баррем) характерны аналогичные фанарскому горизонту условия седиментации – мелководье с переменной гидродинамикой и близкими источниками сноса, что подтверждается сходным распределением на диаграмме Диккинсона.

В апте (убинская свита) условия сменились на мелководно-морские с активной гидродинамикой. Хорошая сортировка и окатанность метаморфического материала, по классификационной диаграмме Диккинсона (поля рециклированных комплексов и кратона) свидетельствуют об удаленном платформенном источнике сноса – севера Скифской плиты и Восточно-Европейской платформы.

В ходе подробных минералого-петрографических исследований было установлено, что в бассейн седиментации, существовавшем в нижнем меле на Северо-Западном Кавказе, обломочный материал поставлялся из нескольких источников сноса. Основным источником являлась Скифская плита, поставлявшая большую часть обломочного материала. Об этом свидетельствует преобладание кварц-сланцевых сланцев и кварцитов среди литокластов. Второй источник сноса имел меньшее влияние, он располагался ближе, предположительно, на юго-востоке территории в районе современного Большого Кавказа. Об этом свидетельствует плохая окатанность обломков и наличие вулканического материала в песчаниках. Также возможно влияние древних выступов к северо-западу от бассейна седиментации. О наличии нескольких источников сноса также подтверждает отсутствие корреляции трендов изменения содержания в породах обломков метаморфических и магматических пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луппов Н.П. Нижнемеловые отложения Северо-Западного Кавказа и их фауна. М.: Труды ВНИГНИ, 1952. 272 с.
2. Мордвилко Т.А. Нижнемеловые отложения Северного Кавказа и Предкавказья. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 257 с.
3. Бурлин Ю.К. Литолого-фациальные особенности нижнемеловых отложений Северо-Западного Кавказа и Западного Предкавказья. М.: Академия наук СССР, 1961. 394 с.
4. Егоян В.Л. Геология и нефтегазоносность Западного Кавказа и Западного Предкавказья (фауна и стратиграфия мезозоя и кайнозоя). М.: Недра, 1969. 224 с.
5. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. Изд-во Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. М.: 2008. С. 191–224.
6. Корсаков С.Г., Семенуха И.Н., Белуженко Е.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000, Изд.

второе, Серия Кавказская, Лист L-37-XXVII, Объяснительная записка. М.: 2013. 216 с.

7. Шутов В.Д., Коссовская А.Г., Муравьева В.И. и др. Граувакки. М.: Наука, 1972. 333 с.

8. Петтиджон Ф. Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.

9. Лидер М.Р. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с.

10. Шутов В.Д. Минеральные парагенезы граувакковых комплексов. М.: Наука, 1975. 115 с.

11. Dickinson W.R. Compositions of sandstones in Circum-Pacific subduction complexes and fore-arc basins // AAPG Bull. 1982. P. 121–137.

12. Dickinson W.R. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. J. Sed. Petrol. 1970. P. 695–707.

13. Шванов В.Н., Фролов В.Т., Сергеева Э.И. и др. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов. Спб.: Недра. 1998. 352 с.

14. Швецов М. С. Петрография осадочных пород. Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во, 1958. 415 с.

The source provinces for the Lower Cretaceous deposits of the Northwestern Caucasus have been reconstructed. It was established that the main source of detrital material was located in the northeastern direction, within the Scythian Plate. A secondary more weakly source of sediment supply existed in the southeastern direction, in the area of the Greater Caucasus.

Лысенко Е.И.¹, Ткач А.А.¹, Ткач Н.Т.², Росляков А.Г.²

(¹Географический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, e-mail: lenobl1996@gmail.com; ²Геологический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва)

Диатомовые водоросли в колонке донных отложений Среднего Каспия

Lysenko E.I.¹, Tkach A.A.¹, Tkach N.T.², Roslyakov A.G.²

(¹Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Diatoms in the sediment core from the Middle Caspian

Ключевые слова: микропалеонтология, палеоэкологические реконструкции, донные отложения, Каспийское море

Изучены диатомовые комплексы из колонки донных отложений (мощность 0–186 см) Среднего Каспия. Выделены три основных комплекса: пресноводно-солонатоводный (186–117 см), неритический (110–46 см) и океаническо-неритический (близкий к современным условиям Среднего Каспия, 46–0 см). Стоматоцисты золотистых водорослей широко представлены в осадках с пресноводно-солонатым и неритическим диатомовыми комплексами.

Диатомовые водоросли в современном бассейне Среднего Каспия составляют основу биомассы фитопланктона [1]. В неоплейстоцене и голоцене климатические условия Каспийского региона неоднократно менялись, что оказало влияние на палеоэкологические условия осадконакопления и отразилось в видовом составе диатомовых водорослей как преобладающей группы в фитопланктоне.

Диатомеи в четвертичных осадках Среднего Каспия изучены рядом авторов, в том числе – в рамках комплексных исследований донных отложений [2–5]. Согласно опубликованным данным, наибольшая соленость бассейна Среднего Каспия характерна для поздней стадии его развития, которая реконструирована в осадках из верхних частей колонок донных отложений. Во всех работах отмечается наличие пресноводных диатомей, которые предположительно связываются с развитием позднехвалынского или послехвалынского [2, 3] бассейнов. В этих отложениях выявлена крайне низкая численность створок диатомей.

Нами изучены отложения из колонки St-7 мощностью 606 см, отобранной с глубины 749 м в центральной части бассейна Среднего Каспия. Для этого материала коллективом авторов были ранее опубликованы результаты изучения цист динофлагеллят [6]. Нижняя часть колонки (606–230 см) представлена коричневыми и серо-коричневыми илами с прослоями гидротроилита. В интервале 606–423 см прослои залегают почти горизонтально, на глубине 423–310 см наклон данных прослоев составляет от 15 до 5 градусов, 310–230 см – наклон около 3

градусов, прослои прослеживаются в виде размытых очертаний и пятен. Интервал 230–20 см представлен светло-серыми илами, на глубине 115–20 см осадки обогащены органикой, отмечаются отдельные прослои диатомовых водорослей болотно-зеленого цвета. Верхние 20 см представлены полужидкими глинистыми илами болотного и светло-серого цвета.

Первоначально проведено изучение смер-слайдов (smear-slides, препаратов-мазков) – тонких мазков необработанного осадка под микроскопом [7], отобранных через 50 см по всей колонке, с целью выявления остатков диатомовой флоры и выбора интервала для подробного исследования диатомовым методом. Препараты-мазки изучались с помощью светового микроскопа JENVAL (Carl Zeiss) при увеличении в 400 раз во влажном виде. Техническая обработка образцов и подготовка постоянных препаратов для микроскопирования проводилось по стандартным методикам [8]. Таксономическое определение диатомей на основе изучения структуры их створок произведено с помощью светового микроскопа JENVAL (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена. Определение контролировалось при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Jeol JSM-6480LV в центре коллективного пользования на базе Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ.

По результатам анализа препаратов-мазков остатки диатомей выявлены в интервале 186–0 см, из которого далее подготовлен и подробно изучен диатомовым методом 31 постоянный препарат. Мощность прослоев осадка для изготовления препаратов составляла 2–3 см.

По результатам диатомового анализа на глубине 186–117 см в серых илах с прослоями гидротроилита наблюдается чередование пресноводно-солонатоводных (186–181, 166–163 и 130–120 см) и солонатоводных (177–175 см и 150–132.5 см) комплексов прибрежных участков морей. В первых отмечается крайне низкая концентрация створок диатомей, выявлены единичные створки и обломки пресноводных видов *Epithemia adnata*, *Cocconeis placentula*, *Aulacoseira granulata*, а также малочисленные створки планктонных неритических видов *Actinocyclus octonarius* и *Cyclotella caspia*, которые приурочены к прибрежным опресненным участкам морей. В солонатоводных комплексах доминируют неритические виды рода *Actinocyclus*: *A. octonarius*, *A. octonarius* var. *tenellus*, *A. curvatulus*. Меньшей численности достигает *Cyclotella caspia*, встречаются единичные створки и обломки морских таксонов *Grammatophora* sp. и *Thalassiosira eccentrica*.

В интервале 110–46 см в серых и светло-серых илах выявлены более стабильные условия морского бассейна с меньшей соленостью относительно современного Среднего Каспия. Преобладают планктонные

неритические виды рода *Actinocyclus* (*A. normanii*, *A. octonarius*, *A. octonarius* var. *tenellus*, *A. curvatus*) и *Cyclotella caspia*. Менее массово встречаются створки и обломки морских видов *Grammatophora* sp., *Thalassiosira eccentrica* и *Coscinodiscus radiatus*. С глубины 72 см *C. radiatus* отмечается среди доминант. Это морской эвригалинный, океаническо-неритический вид, типичный для Каспия. Повышение его доли свидетельствует об увеличении солености бассейна.

В интервале 46–9 см *Coscinodiscus radiatus* является абсолютным доминантом, что свидетельствует об условиях наиболее соленого и глубокого морского бассейна среди реконструированных обстановок. Также встречаются единичные створки неритических видов *Actinocyclus normanii*, *A. octonarius* и *Thalassiosira eccentrica*. Судя по неизменному составу диатомей и их высокой численности в образцах этого интервала, условия были стабильны во времени.

Данный набор видов и общий тренд в развитии бассейна в целом соотносится с литературными данными. Однако нами также выявлено наличие многочисленных цист золотистых водорослей (стоматоцист), предположительно, одного морфотипа. Они встречаются по всей колонке, наиболее массово – в нижней части изученного интервала (186–46 см), для которого реконструируются солоноватоводные и пресноводно-солоноватоводные условия. В интервалах с пресноводно-солоноватоводными комплексами диатомей цисты золотистых водорослей составляют подавляющее число среди изученных кремнистых микрофоссилий, сокращение численности створок диатомей не сказывается на представленности стоматоцист. По литературным данным, в современном фитопланктоне Каспия золотистые водоросли представлены одним видом – *Dinobryon pellucidum* [9], однако для однозначных реконструкций требуются данные о морфологических типах стоматоцист, которые формирует этот вид.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект №24-77-00011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимина Т.Н., Ардабьева А.Г., Котельников А.В. Характеристика современного состояния фитопланктонных вселенцев Каспийского моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 3. С. 101–110.
2. Жаковщикова Т.К. Диатомовые водоросли в колонках донных отложений Каспийского моря // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190. № 4. С. 915–918.
3. Жаковщикова Т.К. Диатомеи из четвертичных отложений Среднего и Южного Каспия // Микропалеонтология океанов и морей. М.: Наука, 1974.

С. 179–186.

4. Свальнов В.Н., Поляков А.С., Казарина Г.Х., Росляков А.Г. Четвертичные осадки западной части Дербентской котловины (Средний Каспий) // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2008. № 4. С. 59–74.

5. Лопатина Д.А., Пирумова Л.Г., Сорокин В.М. Диатомовая флора из верхнечетвертичных осадков Каспийского моря // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1996. Т. 4. № 1. С. 15–26.

6. Leroy S.A.G., López-Merino L., Kozina N. Dinocyst records from deep cores reveal a reversed salinity gradient in the Caspian Sea at 8.5–4.0 cal ka BP // Quaternary Science Reviews. 2019. V. 209. P. 1–12.

7. Лисицын А.П., Петелин В.П. К методике предварительной обработки проб морских осадков в судовых условиях // Труды Института океанологии. 1956. Т. 19. С. 240–251.

8. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные) / Под ред. Глезер З.И., Жузе А.П., Макаровой И.В. и др. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.

9. Салманов М. А. Роль микрофлоры и фитопланктона в продукционных процессах Каспийского моря. М: Наука, 1987. 214 с.

Diatom assemblages from the sediment core (thickness 0–186 cm) in the Middle Caspian were studied. We identify three main assemblages: freshwater-brackish (186–117 cm), neritic (110–46 cm) and oceanic-neritic (similar to modern environments of the Middle Caspian; 46–0 cm). We found chrysophycean stomatocysts widely presented in the sediments with freshwater-brackish and neritic diatom assemblages.

Маленкина С.Ю.

(Музей Землеведения МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: maleo@mail.ru)

**Реконструкции палеогеографических обстановок
формирования различных строматолитов Европейской
части России**

Malenkina S.Y.

(The Earth Science Museum at Moscow State University, Moscow)

**Paleogeographic environment reconstructions of the various
stromatolites formation in the European part of Russia**

Ключевые слова: желваковые, пластовые и столбчатые строматолиты, юра, меловой, оксфорд, кимеридж, палеоцен, Московская область, Приуралье, Поволжье

На основе многолетних исследований Москвы, Московской, Костромской, Нижегородской, Оренбургской областей и Поволжья предложены палеоэкологические и палеогеографические реконструкции формирования строматолитовых построек различного типа.

За многие годы изучения микробиальных построек и в частности строматолитов была собрана представительная коллекция из Москвы, Московской, Костромской, Нижегородской, Оренбургской областей и Поволжья [1–4]. Они различаются по возрасту, составу и форме. Морфологически строматолиты представляют собой одиночные тела разнообразной формы и размеров или скопления и разделяются на пластообразные, линзовидные, куполовидные, желваковые и столбообразные постройки. Состав построек чаще всего карбонатный, но отмечаются также железистые, фосфатные, глауконитовые и кремнистые. Иногда наблюдается переслаивание светлых карбонатных слоев осажженных цианобактериями, бурых железистых, отложенных железобактериями, иногда фосфата и др., т.е. совершенно разных по составу и осаждавшихся в различных рН и Eh условиях. Это косвенно свидетельствует, что эти слои могли формироваться одновременно различными бактериями и цианобактериями единого микробиального мата.

Изученные строматолитовые постройки Европейской России, относятся, согласно классификации М.Е. Раабен [4], к морфологическим типам желваковых, столбчатых и пластовых строматолитов и приурочены к различным свитам среднего мелово-кимериджа и палеоцена [1, 3, 4]. Постройки сформированы тонкими чередующимися слоями известкового вещества (от мкм до 1–2 мм), иногда ожелезненного, пиритизированного, глауконита и фосфата, редко нацело фосфатны или же окварцеваны. Слои разной толщины, четкие, волнистые, с выпуклыми вверх наслоениями, иногда распадающиеся на короткие микростолбики. Продуцентами являются преимущественно цианобактерии в сообществе с различными

бактериями (в СЭМ видны минерализованные чехлы нитей и остатки гликокаликса). В постройках могут присутствовать красные водоросли (соленопоровые). Часть из этих строматолитов сформированы только синседиментационным микробиальным осаждением, в других же имеются терригенные зерна, фауна и ее фрагменты, скрепленные растущим матом.

Келловейские и нижнеоксфордские строматолиты – желваки, корки и пластовые постройки (от первых см до 15–25 см) (рис. 1а), на которых отмечаются серпулиды, двустворки, гастроподы, во вмещающем осадке – остатки морских головоногих, что свидетельствует, что микробиалиты формировались в морских условиях, по характеру осадка – в нижней части литоральной зоны с периодически активной гидродинамикой и частично в сублиторальной зоне с более спокойными условиями. Среднеоксфордские постройки представлены бугристыми полусферами и желваками (10–25 см), на которых обычно наблюдаются серпулиды, двустворки, гастроподы, брахиоподы, морские ежи и корневые части стеблей стеногалинных *Cyclocrinus insignis* (Trautschold), свидетельствующих об условиях нормальной солености. Во вмещающем осадке обычны остатки аммонитов и белемнитов. По классификации Райдинга [6] часть из них относится к микритовым, часть к пелоидным и агглютинированным строматолитам.

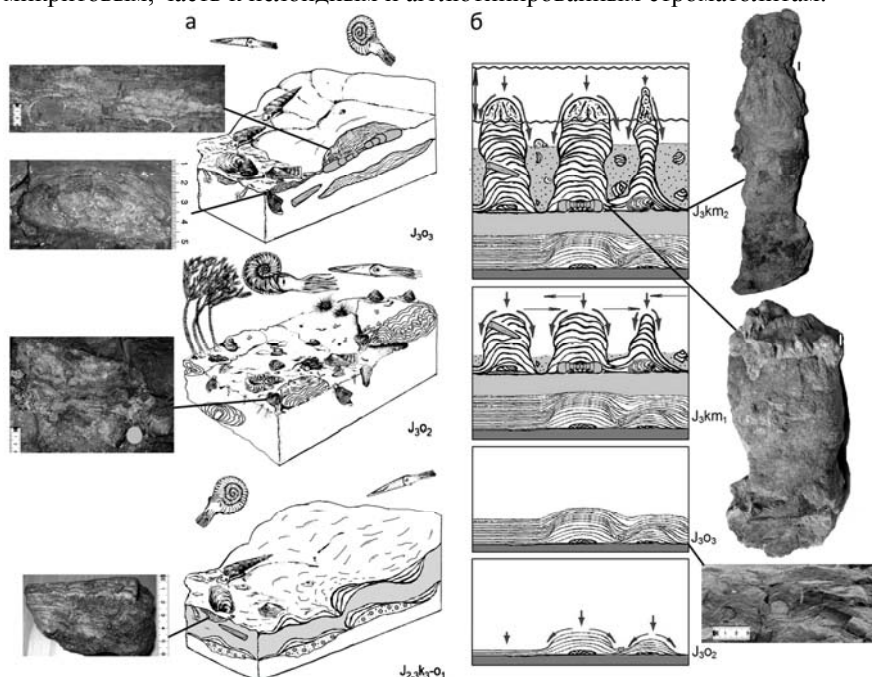


Рис. 1. Реконструкция обстановок формирования юрских строматолитов: а – центральных частей России, б – Оренбургской обл.

Анализируя морфологию построек и особенности вмещающих отложений, можно предположить, что они образовались в литоральной зоне с изменчивой гидродинамикой бассейна на неровном нестабильном субстрате. Верхнеоксфордские строматолиты представляют собой своеобразные комплексы отдельных желваков не очень больших размеров и пластовых образований (мощностью 0.05–0.2 м) в значительной степени глауконитовых по составу, залегающих прямо на глине, либо на остатках макрофауны (желваки), протягивающиеся не прерываясь десятки метров (рис. 1а). На них и в осадках отмечаются многочисленные остатки гастропод, двустворок, брахиопод, аммонитов и белемнитов, что дополнительно свидетельствует о фотической зоне их формирования. Данные строматолиты относятся к микритовым строматолитам по классификации [6] и формировались в преимущественно тиховодной обстановке почти нулевой седиментации в слабо восстановительной среде, вероятно, в дистальных частях сублиторали.

Особым случаем являются фосфатные кимериджские пластовые и столбчатые строматолиты долины р. Сухой Песчанки (недалеко от Соль-Илецка) [3] и внешне похожие на них неветвящиеся (редко расщепленные) палеогеновые столбчатые строматолиты Камышина, которые состоят в основном из сцементированных оксидом кремния зерен кварца [4]. В среднеюрское время с юго-востока через Прикаспийскую синеклизу со стороны океана Тетис начала развиваться широкая трансгрессия и данная территория оказалась на перегибе склона, вероятно, в оксфорд-кимериджское время здесь существовали локальные выступы рельефа, на которых и формировались строматолиты. Во время образования нижнего слоя, строматолитовые постройки формировались в достаточно тиховодных условиях сублиторали, на ровном стабильном субстрате, что обусловило их пластовую форму. Кимериджские столбчатые строматолиты, вероятно, возникли на границе литоральной и сублиторальной зон в условиях периодически активной гидродинамики, с существенными поставками терригенного осадочного материала, который обуславливал разобшение строматолитовых построек, их столбообразную форму, что давало возможность ссыпаться излишнему кластическому материалу с построек в промежутки между ними (рис. 1б). Все столбики первоначально сформированы на крупных ядрах макрофауны, предопределивших их изначально куполообразную форму и возможно обеспечивших им питательную среду на раннем этапе. Вероятно, слойки сразу после отложения фосфатизировались путем бактериально опосредованного осаждения аморфного фосфата кальция, процесс минерализации происходил синседиментационно или во время самой ранней стадии диагенеза сразу после деградации и переработки органического вещества отмирающего микробного мата и захваченных распадающихся макрофаунистических остатков нарастающим сверху матом. Камышинские

палеоценовые строматолиты (рис. 2) также представляют собой субцилиндрические вертикальные столбики различного размера: подавляющее большинство среднего размера – диаметром 10–20 см не превышающие 1–1.5 м и редкие единичные диаметром 30–50 см высотой 1–2.5 м. Постройки состоят в основном из сцементированных оксидом кремния зерен кварца с редкими рудными включениями и отпечатками листовой флоры камышинского комплекса. Среди идентифицированных включений выявлены преимущественно восстановленные формы железа, формы, сочетающие железо, хром и никель, а также меди и олова; в явно подчиненном количестве присутствуют оксиды железа и сульфиды железа, мышьяка и меди [4]. Сечения столбиков часто с четкой слоистостью, подчеркнутой чередованием темных и светлых слоев. Иногда она затухает окварцеванием, видимо более поздним, от строматолитов остаются лишь тени. Степень окварцевания очень различается в пределах одного массива. В некоторых случаях она примерно одинакова в строматолитах и вмещающем песчанике, часто вмещающая порода окварцована сильнее, еще чаще наиболее окварцованы стенки, непосредственно примыкающие к строматолитам. Иногда очень заметен контраст плотности вмещающей породы, стенок и менее плотных строматолитовых столбиков, особенно при выветривании. Вероятно, они формировались в сходных с кимериджскими условиях и были первоначально карбонатными, а впоследствии окварцеваны.

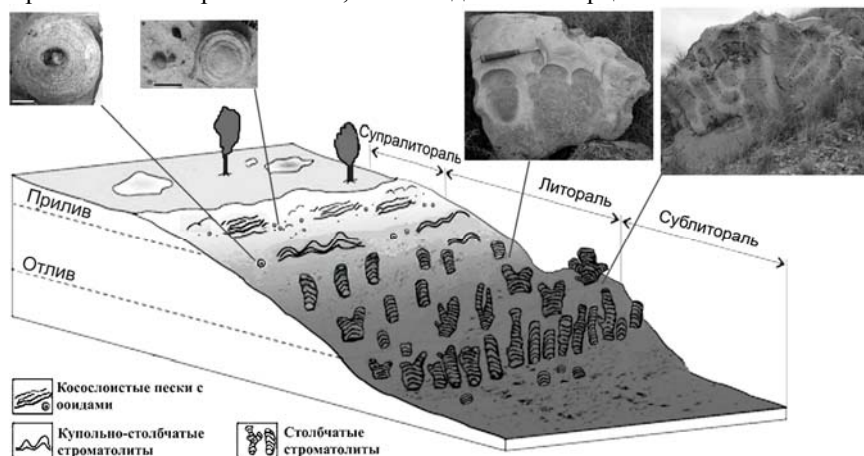


Рис. 2. Реконструкция обстановок осадконакопления существовавших во время формирования микробиальных построек (длина линеек – 1 см).

Проведенные исследования материала из приведенного ряда местонахождений позволяют оценить особенности обстановок формирования микробиальных сообществ и предложить предварительные

реконструкции в виде серии ситуационных палеоэкологических моделей, согласно зональности прибрежной зоны эпиконтинентального морского бассейна. Все изложенное иллюстрирует прямую связь морфологии описанных микробиальных построек с палеогеографическими условиями их образования.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Музея земледения МГУ АААА-А16-116042010088-5 «Эволюция геодинамических обстановок и глобальные природные процессы» (научный руководитель, профессор Е.П. Дубинин)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маленкина С.Ю. Юрские микробиальные постройки Русской Плиты: органоминерализация и породообразующие организмы // Водоросли в эволюции биосферы. Серия «Гео-биологические системы в прошлом». М.: ПИН РАН, 2014. С. 170–186.
2. Маленкина С.Ю. Уникальная коллекция юрских строматолитов Европейской России как потенциал для экспозиции в Музее земледения МГУ // Наука в вузовском музее: Материалы ежегодной Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 12–14 ноября 2019 г. М.: Макс-Пресс, 2019. С. 77–81.
3. Маленкина С.Ю. Фосфатные столбчатые строматолиты долины р. Сухой Песчанки и среда их формирования // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2023. Т. 4. С. 62–66.
4. Маленкина С.Ю., Иванов А.В. Палеогеновые столбчатые строматолиты местонахождения Камышинские уши (Нижнее Поволжье) // Жизнь Земли. 2024. Т. 46. № 2. С. 172–185.
5. Раабен М.Е. Строматолиты // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002. С. 52–58.
6. Riding R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites // Encyclopedia of Geobiology. Encycl. of Earth Science Series. Springer, 2011. P. 635–654.

Based on long-term research in Moscow, the Moscow region, Kostroma, Nizhny Novgorod, Orenburg regions and the Volga region, paleoecological and paleogeographic reconstructions of the formation of stromatolitic structures of various types are proposed.

**Мельникова А.А., Агафонова Е.А., Новичкова Е.А.,
Козина Н.В.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: anmel01-09@mail.ru)

**Диатомовые водоросли в поверхностных осадках
Гренландского моря как индикатор современных
климатических условий**

**Melnikova A.A., Agafonova E.A., Novichkova E.A.,
Kozina N.V.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Diatom assemblages in the surface sediments of the Greenland
Sea as indicators of modern climatic conditions**

Ключевые слова: диатомовые водоросли, поверхностные осадки, поздний голоцен, Гренландское море.

Изучены диатомовые комплексы в поверхностных осадках (0–3 см) из колонки АМК-7056 (Гренландское море). Установлено, что диатомовые ассоциации представлены 29 видами. Присутствие вида-индикатора поступления тихоокеанских вод *Neodenticula seminae* в двух верхних сантиметрах колонки донных осадков указывает на возрастание динамики водообмена в высоких широтах. Наличие вида *Fragilariopsis oceanica* в осадках колонки на глубинах 2–3 см свидетельствует о возможном более близком положении сезонного ледяного покрова, либо области наиболее вероятного айсбергового воздействия в недавнем геологическом прошлом (предположительно 2000–3000 кал. лет назад).

Арктические регионы играют ключевую роль в системе глобальной океанической циркуляции и их изучение важно для мониторинга климатических изменений. Гренландское море – зона взаимодействия теплого Северо-Атлантического и холодного Восточно-Гренландского течения, где даже незначительные изменения ледово-гидрологической обстановки могут служить чувствительным индикатором трансформации природной среды [10]. Изучение диатомовых водорослей позволяет реконструировать изменения параметров водных масс, присутствие льда и поступления пресной воды в голоцене [4]. Особый интерес представляют диатомовые комплексы поверхностных и приповерхностных осадков, отражающие современные процессы и недавние изменения климата.

Целью настоящей работы является выявление особенностей видового состава и количественного распределения диатомовых водорослей в голоценовых отложениях Гренландского моря для реконструкции палеоокеанологических обстановок.

Колонка АМК-7056 длиной 26 см была отобрана мультикорером Mini Мис К/МТ 410 в ходе 84-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в

2021 г. в Гренландском море [3]. Осадки вскрыты в зоне сочленения континентального склона Гренландии и Восточно-Гренландского хребта (76°38.790'с.ш., 1°40.950'з.д., глубина моря 2863 м). В данном месте происходит пересечение возвратной ветви теплого Северо-Атлантического течения и холодного Восточно-Гренландского течения и проходит Полярный фронт. Ледово-гидрологическая обстановка осложнена тем, что в области отбора колонки проходят пути транзита айсбергов, откалывающихся от Гренландского ледникового щита. Осадки колонки представлены алеврито-пелитовым илом оливково-коричневого цвета. По данным экспресс-анализа планктонных фораминифер, можно предположить, что весь интервал колонки 0–26 см соответствует морским изотопным стадиям (МИС) 1–2, а возраст изученных верхних 3 см составляет около 3000 кал. лет, судя по корреляции с близкорасположенными датированными колонками донных осадков [12]. Обработка проб для изучения диатомовых водорослей выполнялась в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН с использованием общепринятой методики [2]. Видовые определения диатомей в препаратах проводились с помощью светового микроскопа ZEISS Primo Star iLED (увеличение $\times 1000$). Количественная оценка состава диатомовых ассоциаций осуществлялась по методу Баттарби [5].

Представительные диатомовые комплексы содержались исключительно в верхнем горизонте от 0 до 3 см. На интервале 3–26 см диатомовые водоросли и другие кремнистые микрофоссилии не обнаружены. В интервале 0–1 см концентрации диатомовых водорослей достигают 186 тыс. ств./г, в то время как на глубине 1–3 см они сокращаются до 100 тыс. ств./г. Установлено, что диатомовые ассоциации представлены 29 видами, которые включали 2 пресноводных вида диатомей и 27 морских видов. Среди морских видов 13 видов отнесены к океаническим, 12 к неритическим и 2 к сублиторальным.

В донных осадках на интервале 0–3 см установлено преобладание холодоводных аркто-бореальных диатомовых водорослей, что указывает на преобладающее влияние холодных арктических вод. Доминируют следующие виды: *Thalassiosira anguste-lineata* (до 21%), *Th. antarctica* (до 14%), *Th. gravis* (1,5%), *Actinocyclus curvatulus* (до 3%), *Shionodiscus trifultus* (до 19%) и *Rhizosolenia hebetata* (до 6%). Также присутствует небольшое количество относительно теплолюбивых видов, таких как *Thalassiothrix longissima* (до 3%), *Coscinodiscus radiatus* (до 4%), *Shionodiscus oestrupii* (до 2%) и *Paralia sulcata* (до 7%).

Особый интерес представляет ледово-морской [7] вид *Fragilariopsis oceanica* (до 0.9%), обнаруженный исключительно на горизонте 2–3 см. Его появление на данном интервале свидетельствует о возможном более близком положении сезонного ледяного покрова, либо области наиболее вероятного айсбергового воздействия в недавнем геологическом прошлом

(порядка 2000-3000 кал. лет назад). На интервале 0–2 см, *F. oceanica* полностью отсутствует.

На глубинах 0–2 см в составе ассоциаций диатомовых водорослей появляется северитихоокеанский планктонный вид *Neodenticula seminae* [8] (до 1.5%). Считается, что *N. seminae* поступает в восточную часть Северной Атлантики вместе с промежуточными водами [6] из моря Лабрадор, в которое он мигрирует из Тихого океана через Канадский Арктический архипелаг в летний сезон [11]. При этом исследование осадочного вещества Норвежского моря показало, что появление *N. seminae* наряду с *S. oestrupii* в осадках может служить однозначным индикатором усиления влияния Северо-Атлантического течения в субполярной Северной Атлантике [1].

Таким образом, изменения в составе диатомовых ассоциаций фиксируют холодные условия и быстрое расширение морского ледяного покрова предположительно во время неогляциации и увеличение температуры поверхностных вод, сопровождавшееся уменьшением площади морского льда и усилением влияния мощного Северо-Атлантического течения после конца неогляциации.

На интервале 0–3 см также были встречены планктонные пресноводные виды *Aulacoseira islandica* (до 0.3 %) и *A. subarctica* (1.6-0.9 %). Их вероятным источником являются водотоки Гренландии [9].

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <http://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы благодарят экипаж и капитана Ю.Н. Горбача, а также М. Д Кравчишину, А.А. Клювиткина и А.Н. Новигатского за помощь в экспедиции. Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 25-27-00123, https://rscf.ru/prjcard_int?25-27-00123.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова Е.А., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. Инвазивные виды диатомовых водорослей в осадочном веществе Лофотенской котловины (Норвежское море) // ДАН. Науки о Земле. 2025. Т. 524. № 1. С. 114–123.
2. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Ленинград: Наука, 1974. 403 с.
3. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Володин В.Д. и др. Системные исследования осадкообразования в Европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663. doi: 10.31857/S0030157422040062.
4. Andresen C., Sha L., Seidenkrantz M. et al. Early Holocene palaeoceanographic and glaciological changes in southeast Greenland // The

Holocene. 2022. № 32. P. 501–514.

5. Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms // *Limnology and Oceanology*. 1973. № 18(4). P. 647–653.

6. Buckley M.W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic meridional overturning circulation: a review // *Rev. Geophys.* 2016. V. 54. P. 5–63.

7. Horner R. Arctic sea-ice biota // *The Arctic Seas. Climatology, Oceanography, Geology, and Biology* / Herman Y. (ed.). New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1989. P. 123–146.

8. Kazarina G.K., Yushina I.G. Diatoms in recent and Holocene sediments of the North Pacific and Bering Sea // *Berichte zur Polarforschung*. 1999. V. 306. P. 120–133.

9. Oksman M., Kvorning A.B., Larsen S.H. et al. Impact of freshwater runoff from the southwest Greenland Ice Sheet on fjord productivity since the late 19th century // *The Cryosphere*. 2022. V. 16. P. 2471–2491. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2471-2022>

10. Pados-Dibattista T., Pearce C., Detlef H. et al. Holocene palaeoceanography of the Northeast Greenland shelf // *Clim. Past*. 2022. V. 18. P. 103–127. <https://doi.org/10.5194/cp-18-103-2022>.

11. Reid P., Johns D., Edwards M. et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: Arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800 000 years // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 1910–1921.

12. Telesiński M.M., Spielhagen R.F., Bauch H.A. et al. Water mass evolution of the Greenland Sea since late glacial times // *Climate of the Past*. 2014. V. 10 (1). P. 123–136. <https://doi.org/10.5194/cp-10-123-2014>

Diatom assemblages in surface sediments (0–3 cm) from core AMK-7056 (Greenland Sea) were studied. It was established that the diatom associations are represented by 29 species. The presence of the indicator species of Pacific water inflow, *Neodenticula seminae*, in the upper two centimeters of the core sediments indicates an increase in water exchange dynamics at high latitudes. The occurrence of *Fragilariopsis oceanica* in the 2–3 cm sediment layer suggests either a closer position of the seasonal sea-ice cover or the area most likely affected by icebergs in the recent geological past (presumably 2000–3000 cal. years ago).

**Меренкова С.И.¹, Карпова Е.В.², Пузик А.Ю.³,
Литвинский В.А.⁴, Шувалова Ю.В.⁴, Медведков А.А.²**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

koshelevasof@mail.ru; ²Московский государственный университет имени М.В.

Ломоносова, Москва; ³Пермский государственный национальный

исследовательский университет, Пермь; ⁴Палеонтологический институт им. А.А.

Борисяка РАН, Москва)

**Литолого-геохимическая специфика и особенности генезиса
терригенно-карбонатных пород нижнеэвенкийской**

подсвиты (средний кембрий, запад Сибирской платформы)

**Merenkova S.I.¹, Karpova E.V.², Puzik A.Yu.³, Litvinsky V.A.⁴,
Shuvalova Yu.V.⁴, Medvedkov A.A.²**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University,

Moscow; ³Perm State National Research University, Perm; ⁴Borissiak Paleontological

Institute RAS, Moscow)

**Lithological and geochemical specificity and genesis features of
terrigenous-carbonate rocks in the Lower Evenki subformation
(Middle Cambrian, Siberian Platform)**

Ключевые слова: Сибирская платформа, средний кембрий, эвенкийская свита, геохимия редких и редкоземельных элементов, изотопный состав углерода и кислорода, обстановки осадконакопления.

Уточнены геохимические и литологические особенности сублиторальных-литоральных образований среднего кембрия – нижнеэвенкийской подсвиты Байkitской антеклизы. Выделено 4 типа доломитов: доломиты со строматолитовой текстурой, доломиты комковато-густковые, доломиты замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита, доломиты замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой. Карбонатные литотипы заметно обогащены Co, Cr, Sc, Rb и обеднены Cu, Zn, Li, Ba, Pb и Sr (относительно кларка в карбонатах). Изучена природа положительной Eu-аномалии. При нормировании на PAAS доломитистых аргиллитов, доломитовых алевролитов, песчаников и алевро-песчаников в основном характерно обогащение TRЗЭ относительно ЛРЗЭ.

Определение условий формирования отложений лагун, себх, приливных отмелей и других переходных зон между сушей и морским бассейном представляет собой одну из самых сложных проблем в исследовании палеозойских и более ранних отложений. Несмотря на активное изучение терригенно-карбонатных и карбонатно-соленосных отложений, формировавшихся в прибрежно-мелководных и субаэральных условиях внутренних районов Сибирской платформы, кембрийские разрезы все еще остаются недостаточно изученными как из-за трудностей с датировкой отложений, так и из-за большого своеобразия фаций, не имеющих

современных аналогов. Настоящая работа направлена на изучение геохимических особенностей и дополнительные петрографические исследования пород, образовавшихся в условиях приливно-отливных отмелей в среднем кембрии.

Описание и фотографирование шлифов производилось с использованием микроскопа Zeiss Axio Scope и программного обеспечения ZEISS ZEN core (МГУ имени М.В. Ломоносова). Анализ отношений стабильных изотопов углерода и кислорода выполняли с использованием приборного комплекса Isoprime precisION-IsoFLOW (пр-во Elementar, Великобритания) на базе кабинета приборной аналитики Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН (ПИН РАН). Лабораторные аналитические исследования элементного состава пород выполнены в Центре коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета методом ICP-MS (спектрометр Bruker AURORA M90, США). Выделены и исследованы следующие литотипы: доломиты со строматолитовой текстурой (3 обр.), доломиты комковато-стустковые (2 обр.), доломиты замещения кристаллические без сохранения первичных структур протолита (1 обр.), доломиты замещения разнокристаллические с реликтовой алевро-пелитовой структурой протолита (2 обр.), доломитистые аргиллиты и доломитовые алевролиты (23 обр.), песчаники и алевро-песчаники аркозовые с базальным доломитовым цементом (5 обр.).

Проанализированные породы характеризуются вариациями $\delta^{13}\text{C}$ от -1.4% до -0.3% и $\delta^{18}\text{O}$ от -7.3% до -5.7% . Значения $\delta^{13}\text{C}$ в образцах доломитов эвенкийской свиты лежат в пределах зарегистрированного диапазона значений $\delta^{13}\text{C}$ кембрийских осадочных карбонатов от -2.5 до 2% PDB [1, 2], но сохранность изотопной системы спорна.

Карбонатные литотипы заметно обогащены Co, Cr, Sc, Rb и обеднены Cu, Zn, Li, Ba, Pb и Sr относительно кларка в карбонатах [3]. При этом в обломочной части доломитов присутствуют кварц, ПШ (ортоклазы, кислые плагиоклазы), слюды (биотит и мусковит), фрагменты гнейсов, кварцитов, кислых эффузивов, железистых силицитов, сидеритов. Содержание РЗЭ в доломитах может дать информацию о составе доломитообразующего флюида. Установлено, что распределение РЗЭ в первичных доломитах наследуется в основном из морской воды и/или морских рассолов и не меняется относительно предшествующих им парагенетических известняков [4]. Состав доломитов эвенкийской свиты нормирован на современную морскую воду [5] и PAAS [6]. Для изучаемых доломитов $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}}$ варьируется от 2.0 до 10.3 (в среднем 7.7), $(\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}} = 0.24\text{--}0.69$, кроме образца SL-3/1, где $(\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}} = 1.56$ (где SN – морская вода). Соответственно, для строматолитового доломита SL-3/1 выявлена отрицательная Ce-аномалия и можно предположить, что на его формирование оказали влияние метеорные воды. Тем не менее, цериевая

аномалия в этом образце быть также следствием седиментации в более богатых кислородом обстановках. Величина Nd_{SN}/Yb_{SN} варьирует от 0.3 до 15.07, что указывает на обогащение ЛРЗЭ за счет терригенной примеси. Как при нормировании на состав современной морской воды, так и на концентрации в UCC, наблюдается выраженная положительная Eu-аномалия. Исключение – образцы SL-6/5 и SL-6/9 с отрицательной Eu-аномалией. При нормировании на состав верхней континентальной коры величина $Eu/Eu^* = [Eu_{ucc}/(Sm_{ucc} * Gd_{ucc})0.5]$ составляет 0.45 и 0.87 соответственно для образцов SL-6/5 и SL-6/9, для остальных исследуемых доломитов – 4.93–6.63. При нормировании доломитов нижнеэвенкийской подсквиты на PAAS также выделяется положительная аномалия Eu (кроме SL-6/9). В то же время в доломитах со строматолитовой текстурой ($Eu/Eu^*=4.9$ –6.6) присутствует тонкорассеянная примесь ПШ и слюд. В доломите замещения кристаллическом (SL-2/2, $Eu/Eu^*=7.8$) наблюдаются остаточные зерна мусковита и плагиоклаза. В свою очередь, для слюд и плагиоклазов нередко характерны примеси Eu. Наибольший коэффициент корреляции (выборка только карбонатных пород) связывает Eu с Li (0.83) и Th (0.95), а также, ожидаемо, с другими ЛРЗЭ. Возникновение положительной Eu-аномалии, вероятно, связано с Eu-содержащими минералами в терригенной составляющей доломитов и смешанных пород, а не гидротермальными растворами. При этом не наблюдается прямой зависимости содержания РЗЭ от количества терригенной примеси, поэтому нельзя исключать влияние восстановительных условий или состава доломитообразующего раствора на распределение РЗЭ в доломитах.

При нормировании на PAAS для доломитистых аргиллитов, доломитовых алевролитов, песчаников и алевро-песчаников в основном характерно обогащение ТРЗЭ относительно ЛРЗЭ (кроме Eu). При этом в образцах SL-4/1, SL-5/3, SL-6/6, SL-6/29, напротив, наблюдается обогащение ЛРЗЭ относительно ТРЗЭ.

Так же, как и в карбонатных литотипах, выявлена положительная Eu-аномалия, кроме образцов SL-4/1, SL-5/3, SL-6/6, SL-6/29. При нормировании на состав верхней континентальной коры величина Eu/Eu^* для доломитистых аргиллитов и доломитовых алевролитов составляет от 0.58 (SL-4/1) до 3.32 (SL-6/4), в среднем – 1.6. Величина Ce/Ce^* варьируется от 0.84 до 1.08. Сумма РЗЭ составляет от 22.1 (SL-6/35) до 126.7 (SL-6/29) г/т. Отношение ненормированных содержаний $\sum ЛРЗЭ$ к $\sum ТРЗЭ$ от 1 (SL-5/9) до 10.89 (SL-6/29), среднее – 3.06. Для песчаников и алевро-песчаников при нормировании на состав верхней континентальной коры величина Eu/Eu^* находится в пределах 5.73–6.68, а Ce/Ce^* – 0.63–0.94. Сумма РЗЭ от 14.5 до 16.85 г/т. Отношение ненормированных содержаний ЛРЗЭ к ТРЗЭ от 2.13 до 2.68 (сумма ЛРЗЭ возрастает за счет Eu).

Диаграмма Hf–La/Th [7] позволяет разграничить поля состава осадочных образований, сформированных за счет разрушения океанических островов,

сложенных толеитовыми базальтами, андезитами, либо кислыми вулканитами, а также показывает области смешения кластики из этих типов пород. На данной диаграмме точки состава карбонатно-терригенных пород эвенкийской свиты попадают в поле фельзитовых источников. Выделяется образец SL-6/29, попадающий в поле образований, сформированных при разрушении островных дуг с преобладанием андезитов. Для этого образца характерно максимальное среди выборки отношение $LP3Э/TP3Э$ и общая сумма $P3Э$. Образец SL-5/7 попадает в поле образований, сформированных за счет разрушения океанических островов с преобладанием толеитовых базальтов. На диаграмме $La/Sc-Th/Co$ [8] состав пород эвенкийской свиты демонстрирует смешанный источник.

Результаты позволяют сделать выводы о характере постседиментационных изменений, геохимических чертах, процессах доломитизации карбонатных и терригенно-карбонатных пород, а при рассмотрении карбонатно-терригенных и терригенных отложений – о влиянии питающих провинций.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИО РАН по теме FMWE-2024-0020. Изотопные исследования осуществлялись за счет средств государственного задания ПИН РАН. Авторы выражают благодарность лаборанту кабинета приборной аналитики ПИН РАН Т.С. Сергеевой и ассистенту кафедры минералогии и петрографии ПГНИУ В.В. Пугачу за помощь в выполнении аналитических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Montanez I.P., Osleger D.A., Banner J.L. et al. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans // *GSA today*. 2000. V. 10. P. 1–7.
2. Saltzman M.R. Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans // *Geology*. 2005. V. 33. № 7. 573. DOI: 10.1130/G21535.1.
3. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
4. Miura N., Kawabe I. Dolomitization of limestone with $MgCl_2$ solution at 150 degrees C: preserved original signatures of rare earth elements and yttrium as marine limestone // *Geochemical Journal*. 2000. V. 34. P. 223–227.
5. Nozaki Y. Elemental distribution. Overview // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2001. P. 840–845. DOI:10.1006/rwos.2001.0402.
6. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Palo Alto, Melbourne: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
7. Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // *Journal of the Geological Society*. 1987. V. 144. № 4. P. 531–542. DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531.

8. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chemical Geology*. 2002. V. 191. № 4. P. 305–327. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X.

The geochemical and lithological characteristics of the Middle Cambrian sublittoral-littoral deposits of the Lower Evenki Subformation (Baikit Antecline) have been refined. Four types of dolomites were identified: 1) stromatolitic dolomites, 2) clumpy-peloidal dolomites, 3) crystalline replacement dolomites with no preserved primary protolith structures, and 4) variably-crystalline replacement dolomites with relict aleuro-pelitic (silt-clay) structure. Carbonate lithotypes are notably enriched in Co, Cr, Sc, and Rb and depleted in Cu, Zn, Li, Ba, Pb, and Sr relative to the average carbonate Clarke values. The nature of the positive Eu anomaly was investigated. When normalized to PAAS (Post-Archean Australian Shale), the dolomitic argillites, dolomitic siltstones, sandstones, and silty sandstones are predominantly characterized by an enrichment of HREE relative to LREE.

**Овсепян Я.С.¹, Талденкова Е.Е.², Махотин М.С.³,
Новихин А. Е.³, Митрофанова Н.О.¹**

(¹Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: yaovsepyan@yandex.ru;

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва;

³Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург)

Выделение экологических групп фораминифер в поверхностных осадках моря Лаптевых

**Ovsepyan Ya.S.¹, Taldenkova E.E.², Makhotin M.S.³, Novikhin
A.E.³, Mitrofanova N.O.¹**

(¹Geological Institute RAS, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow;

³Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg, Russia)

Mechanisms of sedimentation in the northeastern part of the East Siberian Sea based on grain-size data

Ключевые слова: Арктика, море Лаптевых, бентосные фораминиферы, донные осадки

В статье анализируются закономерности распределения бентосных секретионно-известковых фораминифер на шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых. Уточнение экологии видов и выделение экологических групп позволяет проводить подробные реконструкции палеоусловий среды в голоценовых и позднелейстоценовых колонках осадков арктических шельфовых морей России.

Изучение изменений окружающей среды в Арктике можно проводить по реакции биологического сообщества на колебания различных параметров. Эти сведения помогают для проведения современного мониторинга, а также при расшифровке записей палеоархивов морских осадков. Состав сообщества донной микрофауны дает возможность реконструировать параметры природной среды прошлых эпох, такие как продуктивность вод, температура и соленость, ледовитость бассейна, интенсивность речного стока, влияние водных атлантического происхождения. Одной из важнейших групп микроорганизмов для проведения палеоэкологического анализа в голоценовых и позднелейстоценовых осадках являются бентосные фораминиферы.

В работе анализируются данные по 60 станциям с шельфа и континентального склона моря Лаптевых, в диапазоне глубин от 12 до 2596 м. Образцы были отобраны в ходе семи российско-германских экспедиций «ТРАНСДРИФТ» в период с 1993 по 2013 гг. Раковины БФ подсчитывались во фракции >63 мкм. За основу была взята статья Поляка и соавторов [1], в которой описывается распределение бентосных фораминифер в юго-восточной части Карского моря и выделяются экологические группы фораминифер на основе изменения степени влияния пресноводных речных

масс, по мере удаления от берега и увеличения глубины.

Верхний слой воды в море Лаптевых, как в Карском море и Восточно-Сибирском, сильно распреснен из-за влияния Сибирских рек [2]. Этот фактор играет ведущую роль при формировании условий шельфовых арктических морей. Все параметры, связанные с поступлением питательных веществ, можно опосредованно выразить через значения среднесуточной летней поверхностной солености [1]. Для моря Лаптевых выделены экологические группы бентосных фораминифер на основе зависимости максимального содержания отдельных видов от среднесуточной летней поверхностной солености, взятой для последних 50 лет наблюдений. Получившиеся экологические группы соответствуют определенным интервалам глубин и биоэкономическим зонам моря.

К опресненным районам мелководного шельфа с глубинами менее 40 м (поверхностная соленость 10–20‰) тяготеют следующие виды: *Elphidium incertum*, *Haynesina orbiculare*, *Buccella frigida*, *E. bartletti*, *Elphidiella groenlandica*, *Polymorphina* sp., *Guttulina* sp.

Опportunистический вид *Elphidium clavatum*, встречается практически повсеместно, часто достигает высокой численности в стрессовых обстановках.

В районе среднего шельфа с глубинами 40–60 м с незначительным влиянием рек (поверхностная соленость 20–25‰) максимальные значения показывают *Pyrgo williamsoni*, *Nonion labradoricum*, *Elphidium subarcticum*, *Stainforthia loeblichii*, *Quinqueloculina* spp., *Eoeponidella pulchella*. Эти виды также связаны с зоной повышенной продуктивности у кромки льдов [3].

Фораминиферы зоны внешнего шельфа и континентального склона (глубины более 60 м) достигают максимальных значений при поверхностной солености выше 25‰: *Melonis barleeanus*, *Astrononion gallowayi*, *Cibicides lobatulus*, *Islandiella norcrossi*, *Stainforthia feylingi*.

Вид *Cassidulina reniforme* является одним из самых распространенных в море Лаптевых, в отличие от Карского моря, и встречен на разных глубинах моря от шельфа склона. Наряду с *E. clavatum* его относят к опportunистическим видам, которые обитают в стрессовых условиях с неравномерным поступлением питательных веществ [1, 4].

Важной находкой в образцах с континентального склона (глубина 520 м и 774 м) является обнаружение большого количества раковин вида *Cassidulina neoteretis*, который считается индикатором трансформированных атлантических вод в Арктике [5]. Однако ни раковин данного бентосного вида-индекса, ни планктонных фораминифер не было найдено в шельфовых станциях.

Общую картину для моря Лаптевых можно охарактеризовать как улучшение условий по мере удаления от берега. Для построения реконструкций палеосреды обычно используются раковины секреторно-известковых фораминифер, которые лучше сохраняются в морских осадках,

поднятых ударными трубками.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 25-27-00312.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyak L., Korsun S., Febo L.A. et al. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment // J. Foraminiferal Res. 2002. V. 32 (3). P. 252–273.
2. Дмитренко И.А., Кириллов С.А., Грибанов В.А., Кассенс Х. Оценка ледопродуктивности стационарных полыней на шельфе морей Карского и Лаптевых на основе многолетних гидрологических наблюдений // Метеорология и гидрология. 2001. № 12. С. 38–49.
3. Корсун С.А., Погодина И.А., Тарасов Г.А., Матишов Г.Г. Фораминиферы Баренцева моря (гидробиология и четвертичная палеоэкология). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 136 с.
4. Hald M., Steinsund P.I., Dokken T. et al. Recent and Late Quaternary distribution of *Elphidium excavatum* f. *clavatum* in the Arctic seas // Cushman Foundation Special Publication. 1994. V. 32. P. 141–153.
5. Lubinski D.J., Polyak L.A., Forman S.L. Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara seas since ca 13 14C ka: foraminifera and stable isotopes // Quaternary Science Reviews. 2001. V. 20. P. 1851–1879.

The article describes the distribution patterns of benthic calcareous foraminifera on the Laptev Sea shelf and continental slope. Verification of foraminiferal species ecology and determination of the ecological groups allows the provide paleoenvironmental reconstruction in the Holocene and Late Pleistocene sediment cores from the Russian arctic shelf seas.

Пахневич А.В.

(Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, e-mail: alvpb@mail.ru)

Средообразующая роль брахиопод: анализ прошлого и прогноз будущего

Pakhnevich A.V.

(Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow)

The habitat-forming role of brachiopods: analysis of the past and forecast of the future

Ключевые слова: брахиоподы, твердый субстрат, сукцессии, хардграунд, *Macandrevia cranium*

Показана роль массовых поселений ископаемых и современных брахиопод в формировании твердого субстрата и начале сукцессионных смен бентосных сообществ. Предложен прогноз развития донных сообществ и изменения характера грунта в Баренцевом море под воздействием массовых брахиоподовых поселений. Приведен пример значения сообщества брахиопод для формирования верхнедевонского хардграунда.

Начиная с палеозоя, брахиоподы были одной из групп бентосных сестонофагов, влияющей на формирование морских донных сообществ. В ряде сообществ им принадлежала ведущая роль в качестве компонентов донного биофильтра, принимавших участие в осаждении неорганического вещества. Только к концу палеозоя они уступают это место двустворчатым моллюскам. Современные брахиоподы формируют глубоководный пояс океанического биофильтра [1].

Брахиоподовые массовые поселения были не только важным компонентом биофильтра, но также источником формирования твердых донных субстратов. Если большинство современных брахиопод предпочитают селиться на твердом грунте, то в прошлом они расселялись и на мягком дне. Это были свободнолежащие животные с широкой уплощенной раковиной или же с выпукло-вогнутой, которые заякоривались с помощью игл на раковине. Первые относились к отрядам *Strophomenida*, *Orthis*, *Chonetida*, а вторые – к отряду *Productida*. Поверхность раковин в прижизненном состоянии, а также пустых раковин, накопившихся на дне, являлась хорошим источником твердого субстрата, что приводило к запуску сукцессионной смены сообществ, в котором преобладали не обитатели мягких грунтов, а прикрепляющиеся к твердому субстрату организмы. При этом происходила смена характера донного субстрата с мягких илов вплоть до «раковинной мостовой».

Первые примеры сукцессий бентосных сообществ, в которых средообразующую роль играли брахиоподы, описаны из отложений

ордовика и силура. Такая сукцессионная смена сообществ была изучена в среднеордовикских отложениях Северной Америки (штат Алабама). Исходно существовал биоценоз мягких илов. На мягком грунте поселяется пионерное брахиоподовое сообщество, представленное свободнолежащими строфоменидами *Strophomena*. Далее формируется сообщество первой стадии увеличения биоразнообразия: организмы, поселившиеся на раковинах брахиопод, как твердом субстрате. В завершении образуется сообщество второй стадии увеличения биоразнообразия с максимальным разнообразием морских организмов [2].

Сходная картина наблюдалась в отложениях нижнего силура Северной Америки (штат Айова) [3]. Исходно на мягкие грунты поселились свободнолежащие брахиоподы ортотетиды. На следующей сукцессионной стадии на раковинах этих брахиопод появляются прикрепляющиеся ножкой брахиоподы из отряда *Pentamerida*. Это сообщество могло погибать в результате подвижности субстрата. Но потом происходила восстановительная сукцессия и брахиоподы-пентамериды вновь заселяли эти участки дна. И вновь ключевым средообразователем были брахиоподы, формировавшие твердый субстрат.

Из верхнекарбоновых отложений Северной Америки описана еще одна палеосукцессия, связанная со сменой типа донного субстрата при участии брахиопод [4]. В этом случае на мягких илах поселялось сообщество брахиопод из отряда *Chonetida* с преобладающим видом рода *Chonetinella*. На следующих стадиях сукцессии разнообразие сильно увеличивалось, в частности, появлялись якорные брахиоподы *Composita* и *Neospirifer*.

Основная функция палеонтологии – восстановление биоразнообразия прошлого и выявления закономерностей развития вымершей флоры и фауны. Результаты палеонтологических исследований объясняют не только прошлое, но могут также становиться прогнозом развития экосистем в будущем, а также изменений условий обитания. Анализируя накопленный в литературе материал, удалось обнаружить современное брахиоподовое сообщество и спрогнозировать его влияние на изменение условий обитания.

В Баренцевом море, севернее п-ова Варангер на глубинах 270–304 м существуют обширные донные биоценозы с преобладанием сестонофагов, в том числе и брахиопод *Macandrevia cranium*. Плотность поселения макандревий составляет несколько сотен экземпляров на метр квадратный. Основным субстратом для этих брахиопод в данном районе фораминиферы. То есть простейшие являются основой для формирования бентосного сообщества твердых грунтов. Также брахиоподы селятся на пустых раковинах и раковинах соседних особей. Это связано с тем, что они часто прикрепляются друг к другу, образуя друзы. В этом случае брахиоподы значительно влияют на сукцессионную смену сообщества и изменение донного субстрата. В перспективе можно предположить, что разнообразие этого сообщества увеличится. Значительно возрастет и площадь твердого

субстрата.

Брахиоподовые сообщества также становились богатым источником органического вещества, необходимого для формирования бактериальных матов, являющихся основой образования хардграунда. Это хорошо прослеживается на примере франских хардграундов Псковской области. Здесь брахиоподы *Orophomesorhynchus* sp., *Cyrtospirifer schelonicus*, *Ladogia meyendorffii* формировали большие поселения, что дальше приводило к образованию «раковинной мостовой» и поступлению значительного количества органического вещества в окружающую среду. Поверх «раковинной мостовой» формировался хардграунд. Он считается продуктом жизнедеятельности бактерий [5]. То есть брахиоподовое сообщество стало основой начавшейся сукцессии с образованием биоценозов твердого дна.

Таким образом, современных и ископаемых брахиопод не следует расценивать только как организмов, участвовавших в осаждении неорганической взвеси. Массовые поселения этих животных могут значительно менять характер донного субстрата, запуская каскад сукцессионных смен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зезина О.Н. Современные брахиоподы в составе естественного донного биофильтра морей России. М.: Изд-во ПИН РАН, 1997. 85 с.
2. Walker K. R., Alberstadt L.P. Ecological succession as an aspect of structure in fossil communities // *Paleobiology*. 1975. V. 1. № 3. P. 238–257.
3. Johnson M. E. Succession and replacement in the development of Silurian brachiopod populations // *Lethaia*. 1977. V. 10. № 2. P. 83–93.
4. Rollins H.B., Carothers M., Donahue J. Transgression, regression and fossil community succession // *Lethaia*. 1979. V. 12. № 2. P. 89–104.
5. Rozhnov S.V. Hardgrounds of the Ordovician Baltic Paleobasin as a distinct type of sedimentation induced by cyanobacterial mats // *Paleontological Journal*, 2018. V. 52. P. 1098–1113.

The role of mass settlements of ancient and modern brachiopods in the transition of a hard substrate and the beginning of a successional change of benthic communities is shown. A forecast of the development of bottom communities and changes in the nature of the soil in the Barents Sea under the influence of mass brachiopod settlements is proposed. An example of the significance of the brachiopod community for the formation of the Upper Devonian hardground is given.

Пересыпкин Н.Д., Борисов Д.Г., Левченко О.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: nick.peres03@gmail.com)

Литологическая характеристика четвертичных отложений в долине разлома Долдрамс (Центральная Атлантика)

Peresyipkin N.D., Borisov D.G., Levchenko O.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Lithological characteristics of Quaternary sediments in the Doldrums Fracture Zone valley (Central Atlantic)

Ключевые слова: трансформный разлом, контуриты, турбидиты, придонные течения, осадконакопление

В работе представлены результаты анализа колонок из зоны разлома Долдрамс. На осадочное заполнение долины разлома влияют три основных фактора: придонные течения вод антарктического происхождения, гравитационные процессы и фоновая седиментация. И относительный вклад в осадконакопление контрастно меняется в районе исследования с запада на восток.

Центральная Атлантика характеризуется наличием группы крупных близко расположенных субширотных трансформных разломов, простирающихся на сотни и тысячи километров. Эти разломы служат транспортными артериями для Антарктической донной воды (ААДВ). Она является важнейшей частью сложного механизма водообмена Мирового океана. ААДВ является важной частью циркуляции Центральной Атлантики и на своем пути формирует крупные аккумулятивные тела и эрозионные каналы. Осадки, которые формируются под действием придонных течений получили название "контуриты", а геологические тела, сложенные контуритами, стали называться "контуритовыми дрефтами" [7, 8].

Исследование ААДВ – ключ к ответу на вопрос, как менялся Мировой океан в последние несколько миллионов лет: как изменялась система океанической циркуляции и какие свойства имели её воды и какие процессы создавали облик океанского дна. Однако охватить исследованиями обширные площади распространения ААДВ – это задача, требующая очень больших ресурсов. Наиболее перспективными для изучения этого элемента океанической циркуляции являются участки, где придонные течения сужаются, то есть своеобразные «бутылочные горлышки», которые в основном приурочены к долинам трансформных разломов и другим глубоководным проходам.

Разлом Долдрамс, является важным транспортным путем для распространения ААДВ из западной в восточную Атлантику. На данный момент об осадконакоплении в разломе Долдрамс известно очень мало.

Данная работа – важный шаг для исследования влияния придонных течений и других процессов на осадконакопление в регионе.

Цель работ заключается в выявлении особенностей четвертичного осадконакопления в долине разлома Долдрамс.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: (1) исследование текстур осадка; (2) изучение компонентного, минерального и гранулометрического состава осадка; (3) обобщение результатов, составление литологической характеристики; (4) изучение сейсмической структуры верхнего осадочного чехла в долине разлома.

Основой для работы послужили 4 колонки донных осадков, которые были отобраны в нескольких рейсах НИС «Академик Иоффе» и «Академик Николай Страхов» в 2016–2024 гг. (рисунок). Осадки, вскрытые колонками, исследованы комплексом литолого-геохимических методов, что позволило дать их точную литологическую характеристику, а также определить факторы, влияющие на осадконакопление в разломе Долдрамс.

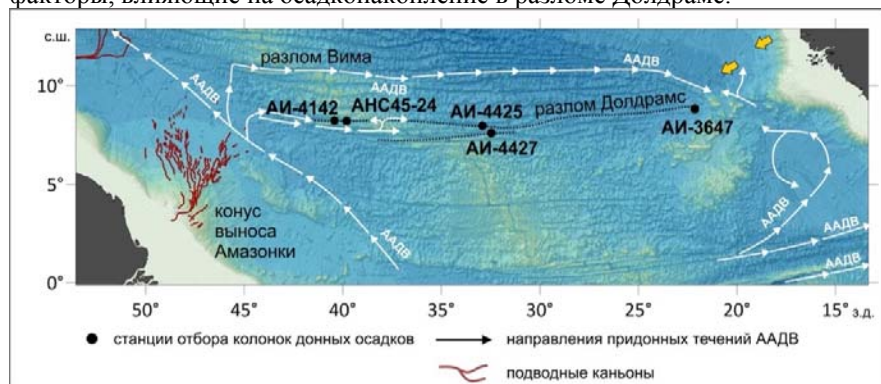


Рисунок. Положение станций отбора колонок донных осадков на батиметрической схеме района работ.

Колонка АИ-4142 получена в долине разлома с глубины 4848 м. Колонка АНС45-24 с южного борта долины с глубины 4019 м. Колонка АИ-4425 получена из центральной части разлома с глубины 5160 м, а колонка АИ-3647 – из центральной части разлома с глубины 4584 м [2–4].

Для исследования колонок использовались такие методы как фотосканирование, геохимическое сканирование методом рентгеновской флуоресценции, гранулометрический анализ, рентгенофазовый анализ, анализ на содержание карбоната кальция волюметрическим методом и изучение компонентного состава осадка в смер-слайдах под поляризационным микроскопом.

Анализ полученных результатов показал, что в западной части разлома (АИ-4142) биогенные карбонатные турбидиты, сформированные турбидными потоками с окружающих хребтов, подстилаются

обогащенными органикой глинисто-алевритистыми илами. В зоне сочленения Срединно-Атлантического хребта (САХ) и долины трансформного разлома преобладают спокойные пелагические условия, что отражено в накоплении пелагических карбонатных илов (колонка АНС45-24).

В восточной части разлома (АИ-3647) осадки представлены окисленными, биотурбированными глинисто-алевритистыми илами с прослоями контуритов. Отмечены резкие границы и значительная изменчивость содержания CaCO_3 по разрезу. Отсутствие явных признаков турбидитов и признаки эрозии указывают на эпизодическое влияние придонных течений на осадконакопление в данном регионе [6, 7, 9].

По данным исследований колонок можно сделать предварительные выводы об осадконакоплении в долине разлома Долдрамс. Важную роль играют придонные течения Антарктической донной воды (ААДВ) и Северо-Атлантической глубинной воды (САГВ), которые переносят взвешенное вещество из Амазонки на сотни километров по разлому Долдрамс [1]. Контуриты, вскрытые в колонке АИ-4425, подтверждают сильное влияние придонных течений на осадконакопление. Предположительно, на осадконакопление в разломе влияет также р. Сенегал, но для того, чтобы полностью убедиться в этом, нужно провести дополнительные исследования. В разрезах, вскрытых колонками, наблюдается результат сложного взаимодействия процессов вертикальной и латеральной седиментации с переходом одного типа осадков в другой в ходе цикла седиментогенеза. Данные минерального состава указывают на признаки подводного выветривания по наличию таких минералов, как: пироксен и оливин [1, 5]. Карбонатные илы на глубине > 5160 м свидетельствуют о современном положении критической глубины карбонатакопления ниже глубин отбора колонок [5]. Напрямую сопоставить колонки по всему объему полученных данных представляется затруднительным, поскольку они отобраны в районах с контрастно отличающимися условиями осадконакопления.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов М.П., Еремеев В.В., Жарков С.М. и др. Строение осадочного чехла Центральной Атлантики. М.: Наука, 1990. 144 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 449).
2. Иванова Е.В., Сколотнев С.Г., Борисов Д.Г. и др. Комплексные исследования зон трансформных разломов Долдрамс и Вима (Центральная Атлантика) в 45-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» // Итоги

экспедиционных исследований в 2019 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. Материалы конференции. Севастополь, 2020. С. 95–96.

3. Иванова Е.В., Борисов Д.Г., Демидов А.Н. и др. Исследования осадконакопления и характеристик водных масс тропической Атлантики в 60-м рейсе НИС “Академик Иоффе” // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 670–672.

4. Иванова Е.В., Борисов Д.Г., Гавриков А.В. и др. Исследования осадочного чехла и магнитных аномалий в трансформных разломах тропической Атлантики (65-й рейс НИС “Академик Иоффе”) // Океанология. 2024. Т. 64. № 5. С. 844–846.

5. Лисицын, А. П. Осадкообразование в океанах. – М.: Наука, 1974. – 438 с.

6. Шепард Ф.П. Морская геология. Ленинград: Недра, 1976.

7. Borisov D.G., Frey D.I., Ivanova E.V. et al Unveiling the contourite depositional system in the Vema Fracture Zone (Central Atlantic) // Sci. Rep. 2023. V. 13. 13834. doi: 10.1038/s41598 023-40401-

8. Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean. Netherlands, Dordrecht: Springer, 2010.

9. Sanders F.E., Friedman G.M. Principles of sedimentology. New York: Wiley, 1978. 792 p.

The paper presents the results of the analysis of sediment cores from the Doldrums Fracture Zone. The sedimentary infill of the Doldrums valley is influenced by three main factors: bottom currents of Antarctic origin, gravity-driven processes, and pelagic settling. The relative contribution of these processes to sediment cover formation changes markedly across the study area from west to east.

Перфилов П.В., Борисов Д.Г., Куликова Ж.М.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: perfilov.pv@ocean.ru)

Устройство отбора аликвотных проб суспензии для лазерного дифракционного гранулометрического анализа морских донных осадков

Perfilov P.V., Borisov D.G., Kulikova Z.M.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

An aliquot subsampling device for laser diffraction grain-size analysis of marine sediments

Ключевые слова: пробоподготовка, 3D-печать, лабораторное оборудование

Предложен и апробирован новый метод отбора аликвотных проб суспензии из лабораторных стаканов для подготовки проб донных осадков к гранулометрическому анализу. Разработанный подход позволяет повысить воспроизводимость и точность результатов гранулометрического анализа гетерогенных морских донных осадков.

Гранулометрический анализ, или анализ распределения частиц по размерам широко используется в литологии, палеоокеанологии, материаловедении, почвоведении и биологии. Методы гранулометрического анализа и подготовки образцов подбираются в зависимости от конкретных целей и объектов исследования.

В науках о Земле стандартным методом измерения размера частиц является лазерный дифракционный анализ [1]. Данный метод основан на измерении угла рассеяния и интенсивности когерентного света при прохождении лазерного луча через образец суспензии в измерительной ячейке. Преобразованием данных о рассеянном свете в информацию о размере частиц происходит с помощью алгоритма, реализующего теорию рассеяния Ми. Широкое применение этого метода объясняется малым временем и стоимостью анализа, широким диапазоном измеряемых размеров частиц от 0.1 до 3000 мкм, возможностью работы с небольшими навесками образцов менее 1 г, а также высоким разрешением и точностью [1]. К его недостаткам относится зависимость результатов от формы частиц, их оптических свойств и концентрации в суспензии. Основным источником ошибок при лазерном дифракционном анализе является процедура отбора серии аликвот непосредственно перед проведением анализа [2], что особенно актуально для гетерогенных образцов, таких как донные отложения Мирового океана.

Наиболее часто в литературе описывается метод отбора аликвот с использованием пипетки Пастера. Образец, залитый дистиллированной водой, переводится во взвешенное состояние при помощи вращательных

движений стакана или магнитной мешалки, после чего оператор по сложной траектории забирает часть пробы и помещает ее в проточную ячейку анализатора. Несмотря на кажущуюся простоту и легкость воспроизведения, данный метод имеет ряд недостатков. Полная гомогенизация образцов донных осадков, включающих глину, сilt и песок, практически невозможна: фракция крупнее 63 мкм не переходит полностью во взвешенное состояние и быстро оседает на дне. В случае слишком близкого расположения пипетки ко дну это может привести к обогащению отбираемой аликвоты грубозернистым материалом и, как следствие, к уменьшению содержания крупной фракции в остальной части образца, или, наоборот, к изъятию всей тонкой фракции при первом погружении пипетки. Описанный эффект ухудшает воспроизводимость результатов анализа гранулометрического состава [3].

В работе [1] для решения этой проблемы был предложен метод деления аликвот, предполагающий многократное разделение взвешенного материала на два стакана до получения желаемого количества представительных проб, однако данный подход не полностью решает проблему обогащения пробы крупной фракцией, поскольку для разделения все еще применяется пипетка Пастера.

Данная работа посвящена новому подходу отбора аликвот из образцов морских донных осадков для изучения их гранулометрического состава, который основан на одновременном выделении из общего объема суспензии в лабораторном стакане трех одинаковых изолированных объемов (аликвотных проб) с идентичной вертикальной структурой. Данный подход реализуется с помощью специально разработанного электромеханического пробоотборника (рис. 1) в соответствии с разработанным протоколом.

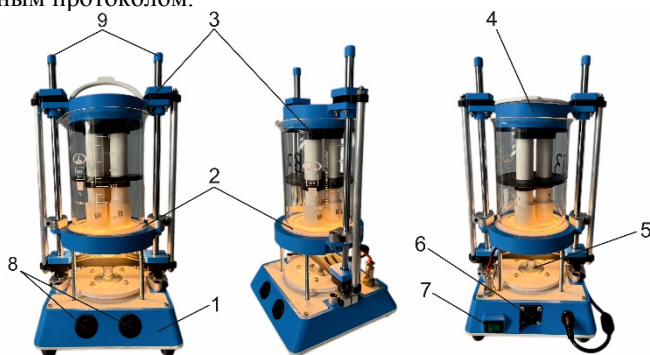


Рис. 1. Схема устройства: 1 – корпус, изготовленный при помощи 3D-печати; 2 – полупрозрачная платформа с LED-подсветкой для химического стакана; 3 – блок из трех закрепленных трубок с силиконовыми насадками на концах; 4 – подвижная рама с кольцом, прижимающим блок трубок ко дну стакана для создания изолированных объемов суспензии при

включении электромагнита; 5 – металлическая пластина, контактирующая с электромагнитом; 6 – вентилятор охлаждения; 7 – кнопка включения электропитания; 8 – кнопки включения электромагнита и LED-подсветки; 9 – направляющие валы для рамы с прижимным кольцом.

Для проверки воспроизводимости результатов анализа аликвот, полученных с помощью предлагаемого метода изолированных объемов, был проведен эксперимент на смеси силикагеля с известными гранулометрическими характеристиками. В ходе эксперимента было отобрано и проанализировано 36 аликвот. Гранулометрический анализ каждой аликвоты выполнялся на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD-2300 (Япония), после чего были построены соответствующие кривые распределения частиц по размерам (рис. 2). Анализ полученных данных демонстрирует высокую степень сходства мономодальных распределений размеров частиц во всех аликвотах, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости метода.

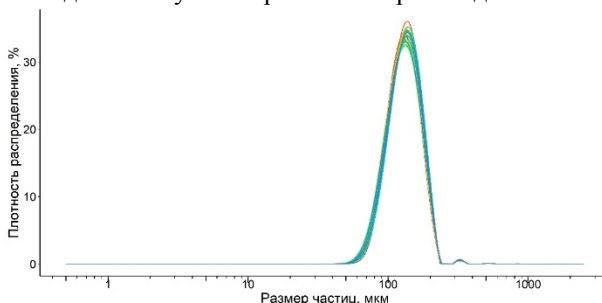


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа 28 аликвот.

Помимо визуальной оценки сходства аликвот было проведено статистическое сравнение всех распределений размеров частиц при помощи теста Колмогорова-Смирнова. Были выполнены попарные сравнения для всех 36 аликвот, в результате которых получено 630 значений р-уровней значимости и D-статистики. Все 630 значений р-уровня значимости превышают пороговое значение 0.05, что указывает на отсутствие оснований для отклонения нулевой гипотезы и подтверждает, что аликвоты, отобранные методом изолированных объемов, являются представительными, а их гранулометрические распределения статистически схожи между собой. Наибольшее значение параметра D, который представляет собой максимальную разницу между двумя кумулятивными функциями распределения двух сравниваемых выборок, составило всего 0.07 (7%) Это так же свидетельствует о высокой степени схожести полученных аликвот.

В данной работе описывается новая, усовершенствованная версия

прибора [4]. Результаты эксперимента демонстрируют, что воспроизводимость анализа, достигнутая с помощью модернизированной установки, в несколько раз превышает аналогичные показатели, полученные на предыдущей версии устройства (максимальное значение D с использованием предыдущей версии составило 38%)

В рамках представленной работы был предложен и апробирован новый метод отбора аликвотных проб суспензии для подготовки образцов морских донных осадков к гранулометрическому анализу. Разработанный подход к выделению аликвот позволяет повысить точность и воспроизводимость результатов анализа, минимизировать влияние человеческого фактора и разделить процессы выделения аликвот и проведения анализа. Использование технологии 3D-печати при изготовлении деталей и корпуса прибора обеспечивает возможности для их последующего усовершенствования и модификации. Разработанное устройство имеет небольшие габариты и массу, низкую себестоимостью производства. Оно отличается простотой эксплуатации и не требует специальной квалификации оператора. Устройство может применяться в полевых условиях и является совместимым со всеми типами анализаторов размеров частиц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen Z., Conway N., Hanebuth T.J.J. A novel binary pipette splitting sediment subsampling method for improving reproducibility in laser-diffraction particle-size analysis // *MethodsX*. 2021. № 8. P. 101493. doi: 10.1016/j.mex.2021.101493.
2. Miller B.A., Schaetzl R.J. Precision of soil particle size analysis using laser diffractometry // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. V. 76. № 5. P. 1719–1727.
3. International Organization for Standardization. Particulate materials – sampling and sample splitting for the determination of particulate properties (ISO Standard No: 14488:2007). 2007.
4. Перфилов П.В., Борисов Д.Г., Куликова Ж.М. Устройство отбора аликвотных проб для лазерного дифракционного гранулометрического анализа морских донных осадков // Труды XIII Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)". 2025. Т. IV. С. 516–519.

A new method for collecting aliquots of suspension from laboratory beakers to prepare bottom sediment samples for particle size analysis has been proposed and tested. The developed approach improves the reproducibility and accuracy of particle size analysis results for heterogeneous marine bottom sediments.

Рубан Д.А.

(Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: ruban-d@mail.ru)

Палеогеографическое положение Сахрайской суши в Кавказском море на переходе от триаса к юре

Ruban D.A.

(Southern Federal University, Rostov-on-Don)

Paleogeographical position of the Sakhray land in the Caucasian Sea at the Triassic–Jurassic transition

Ключевые слова: Западный Кавказ, мезозой, скалистое побережье

Обнаруженная в бассейне р. Белой (Западный Кавказ) пачка конгломерато-брекчий маркирует скалистое побережье Сахрайской суши, существовавшей в Кавказском море на переходе от триаса к юре. Сравнительный анализ современных и ранее полученных геологических данных указывает на самостоятельность расположенных рядом Сахрайского и Даховского островов до времени общего поднятия территории.

Триасовые отложения ограниченно распространены в центральной части Западного Кавказа. Однако они отличаются литологической пестротой, значительной мощностью и вполне удовлетворительной обнаженностью в речных долинах. В последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в понимании их стратиграфии и фациальных особенностей [1, 2]. Тем не менее, отдельные вопросы, имеющие принципиальное значение для палеогеографических реконструкций данной территории, которая, в целом, была занята раннемезозойским Кавказским морем, остаются открытыми. Их решению должны способствовать результаты новых геологических исследований в Республике Адыгея и, в частности, в окрестностях пос. Новопоходное (рис. 1).

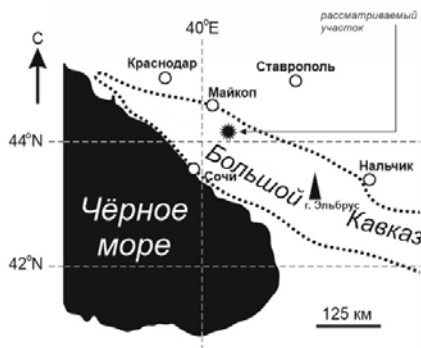


Рис. 1. Географическое положение рассматриваемого участка.

На рассматриваемом участке в долине р. Гош (левый приток р. Сахрай,

бассейн р. Белой) была обнаружена пачка конгломерато-брекчий с изолированным тектоническим положением. Она связана с полем распространения триасовых осадочных пород, обрамляющих Сахрайский кристаллический массив, слагаемый большей частью позднепалеозойскими гранитоидами. Данная пачка имеет очевидное значение для понимания конфигурации островной суши в Кавказском море. Предыдущие исследования, имевшие иной фокус, касались соответствующих вопросов лишь опосредованно [3]. Настоящая работа призвана дать на них более четкий ответ.

Пачка конгломерато-брекчий включает окатанные, но чаще в той или иной мере угловатые обломки различных размеров и форм (рис. 2). В составе много обломков нижнетриасовых плитчатых известняков и верхнетриасовых рифогенных известняков. В соответствии с современными представлениями [4], эти отложения отнесены к фации скалистых побережий, что напрямую указывает на существование суши. Будучи связанной с Сахрайским массивом (это понятие может быть использовано для собственно Сахрайского кристаллического массива и прилегающего к нему поля распространения триасовых осадочных пород), эту сушу логично называть Сахрайской. По косвенным данным, пачка конгломерато-брекчий датирована переходным интервалом от триаса к юре [5].



Рис. 2. Фрагмент пачки конгломерато-брекчий в долине р. Гош.

В связи с вышесказанным возникают два вопроса. Во-первых, насколько самостоятельной была Сахрайская суша, т.е. представляла ли она

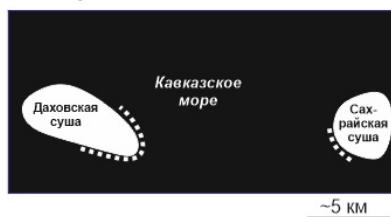
отдельный (скорее всего, небольшой) остров в Кавказском море или же объединялась с расположенной рядом (на расстоянии нескольких километров) и при этом более крупной Даховской сушей? Последняя представляла собой остров, существовавший на протяжении, как минимум, позднего триаса–ранней юры [3]. Основу Даховской суши составлял Даховский кристаллический массив, включавший гранитоиды, аналогичные сахрайским [5], а также некоторое количество докембрийских метаморфических пород. Во-вторых, каково отношение Сахрайской суши к общему поднятию территории, которое имело место на Большом Кавказе на переходе от триаса к юре и способствовало заметному перерыву в осадконакоплении [6]? Ведь получается, что остров со скалистым побережьем существовал примерно тогда же, когда происходило данное поднятие и море повсеместно регрессировало.

Прежде всего, отметим, что в рассматриваемое геологическое время участки суши были связаны и с Даховским [3], и с Сахрайским массивами. Пониманию их пространственного взаимоотношения способствует тщательный анализ работ советских геологов, изучавших данную территорию в первой половине XX века. Они содержат уникальную информацию, которую не удалось обнаружить в более поздних публикациях (вероятно, при причине меньшей детальности последних), а повторно собрать ее затруднительно из-за труднодоступности местности. Было отмечено, что на восточных и южных окраинах Даховского массива непосредственно на гранитоидах залегает своеобразная толща грубообломочных пород, в нижней части которых отмечено присутствие рифогенных известняков [7, 8]. Последние явно поздне триасовые, и такой же возраст имеют вмещающие их обломочные породы, формировавшиеся на скалистом побережье Даховской суши [3]. Однако толща, судя по описанию, более мощная и перекрывается типично нижнеюрскими отложениями [7]. Из этого следует, что накопление грубообломочных пород на побережье Даховской суши синхронизировалось с такими же процессами по побережью Сахрайской суши. При этом участки, где оно происходило, располагались напротив друг друга. Современная близость массивов позволяет предполагать, что их взаимное расположение было таким же и на переходе от триаса к юре, несмотря на сильную «переработку» геологического строения территории тектоническими процессами мезозоя и кайнозоя. Получается, что Даховская суша и Сахрайская суша были самостоятельны и представляли собой острова в Кавказском море, разделенные проливом (рис. 3, сценарий 1). На их самостоятельность указывает и присутствие в составе пачке конгломерато-брекчий из долины р. Гош большого количества обломков нижнетриасовых известняков, каковые не ассоциируют с Даховским массивом.

Сценарий 1 (более вероятный)

Сценарий 2 (менее вероятный)

Переход от триаса к юре



Самое начало юры

Горная страна

~5 км



Горная страна

~5 км

Рис. 3. Возможные сценарии развития рассматриваемого участка на рубеже триаса и юры. Жирным пунктиром отмечено установленное скалистое побережье.

Ответ на второй вопрос представляется более сложным. Тектонические условия залегания пачки конгломерато-брекчий и раннеюрских пород на периферии Сахрайского массива указывает на наличие углового несогласия между ними [5], что соответствует представлениям об общем поднятии. В случае Даховского массива таких наблюдений не было сделано. Однако угловое несогласие и соответствующий ему перерыв в осадконакоплении вполне допустимы и в этом случае, тогда как зафиксировать их с учетом интенсивности тектонических деформаций оказалось бы возможно лишь в случае наблюдения непосредственного контакта (как в долине р. Гош). В таком случае получаем, что Даховский и Сахрайский острова развивались самостоятельно вплоть до общего поднятия территории (рис. 3, сценарий 1). Определить точное время его начала в настоящее время не представляется возможным, но по косвенным признакам оно может быть отнесено к геттангскому или даже синемюрскому веку. Угловое несогласие между триасовыми и юрскими осадочными комплексами указывает на процессы тектонической активности – вероятно, имел место орогенез. Можно также предположить, что поднятие и связанная с ним регрессия происходили постепенно. Если Даховский остров существовал и ранее [3], то Сахрайский остров мог появиться именно в результате начала поднятия.

Однако нельзя исключать и возможности действительно непрерывного

перехода грубообломочной толщи в типично нижнеюрские отложения на периферии Даховского массива. Хотя такой вариант кажется маловероятным с учетом информации о нижнеюрских осадочных комплексах Большого Кавказа [6], получится, что Даховский остров продолжил самостоятельное существование, тогда как Сахрайский остров все-таки стал частью крупного массива суши, возникшей при общем поднятии территории (рис. 3, сценарий 2).

Таким образом, может быть сделан общий вывод о том, что на переходном интервале от триаса к юре в Кавказском море существовали два самостоятельных острова, основу которых формировали Даховский и Сахрайский массивы. Последовавшее затем общее поднятие территории включило их (или, как минимум, Сахрайский остров) в единый и очень крупный массив суши (по всей видимости, горную область).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаицкий В.П., Попков В.И., Попков И.В., Пинчук Т.Н. Триас Северного Кавказа // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 2. С. 11–21.
2. Gaetani M., Garzanti E., Polino R. et al. Stratigraphic evidence for Cimmerian events in NW Caucasus (Russia) // Bulletin de la Societe Geologique de France. 2005. V. 176. P. 283–299.
3. Ruban D.A. Exposure of Carboniferous Granitoids on Triassic-Jurassic Seashores in the Western Caucasus: A Stratigraphical Review // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. V. 12. 1623.
4. Johnson M.E. Ecology of Intertidal Rocky Shores Related to Examples of Coastal Geology across Phanerozoic Time // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. V. 12. P. 1399.
5. Ruban D.A., Zorina S.O., Glinskikh L.A. et al. The Sakhray Canyon geosite as a key locality of late Paleozoic-middle Mesozoic carbonate and other rocks of the Western Caucasus // Carbonates and Evaporites. 2025. V. 40. 38.
6. Юра Кавказа. СПб.: Наука, 1992. 192 с.
7. Вялов О.С., Никшич И.И. Возраст Даховской и Шибабинской интрузий на Северном Кавказе // Вестник Геологического комитета. 1928. №. 9–10. С. 13–15.
8. Дьяконова-Савельева Е.С. Гранитоиды Даховской и Сахрайской интрузий // Ученые записки Ленинградского государственного университета. Серия геолого-почвенных наук. 1940. № 45. С. 190–223.

A member of conglomerate-breccias found in the Belaya River watershed (Western Caucasus) marks a rocky shore of the Sakhray land that existed in the Caucasian Sea at the Triassic–Jurassic transition. The comparative analysis of the modern and previous geological data indicates on individuality of the closely located Dakh and Sakhray islands prior to the overall uplift of the territory.

**Рыбалко А.Е.^{1,2,3}, Усов А.Н.¹, Гусев Е.А.¹, Востриков Н.Н.¹,
Костромина Н.А.^{1,2}**

⁽¹⁾ФГБУ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, e-mail: alek-rybalko@yandex.ru;

⁽²⁾Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург; ⁽³⁾ООО «Морской Центр», Москва)

**Четвертичные отложения Охотского моря: особенности
выделения, картирования и стратиграфического
расчленения**

**Rybalko A.E.^{1,2,3}, Usov A.N.¹, Gusev E.A.¹, Vostrikov N.N.¹,
Kostromina N.A.^{1,2}**

⁽¹⁾FSBI VNIIOkeangeologiya, St. Petersburg; ⁽²⁾Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg; ⁽³⁾OOO Marine Center, Moscow

**Quaternary deposits of the Okhotsk Sea: features of
identification, mapping and stratigraphic division**

Ключевые слова: Охотское море, четвертичные отложения, структурно-фациальное районирование, генетические типы морских отложений, седиментогенез, Тихий океан.

Четвертичное осадконакопление в разных районах Охотского моря существенно различается как из-за изменения глубин, так и из-за изменения источников поступления обломочного материала. В докладе обсуждаются принципы структурно-фациального районирования четвертичных отложений на дне моря, показана связь определенных генетических типов морских отложений с той или иной подзоной структурно-фациального районирования.

Стратиграфия и условия образования четвертичных отложений Охотского и Японского морей, существенно отличается от других морей шельфа РФ. Ведущим фактором седиментогенеза здесь являются чередование трансгрессивных и регрессивных режимов, с которыми тесно связаны приход теплых тихоокеанских вод или преобладающее влияние холодных эпох, вплоть до образования горнодолинного оледенения в северной части Охотского морского бассейна. Завершение этапа геологического картирования шельфовых морей РФ в масштабе 1:1000000, в силу ряда объективных причин, пришлось как раз на дальневосточные моря, когда, начиная примерно с середины второго десятилетия XXI века, стал поступать совершенно новый фактический материал о строении квартера и подстилающих кайнозойских отложений, полученный как организациями Минприроды, так и научными экспедициями Российской Академии наук.

Наше сообщение основано на результатах Государственного геологического картирования шельфа РФ масштаба 1:1000000 листа М-55, охватывающего внутренний шельф Южного Сахалина с бровкой на уровне -

180–200 м с его склоном до глубин 1500–2000 м, часть впадины Дерюгина (более 1790 м), а также небольшой отрезок склона Курильской впадины и ее дна с глубинами и плоским дном на отметках 3000–3300 м. Таким образом, с седиментологической точки морское дно в пределах листа представляет полифациальную систему с мелководно-прибрежной, пелагической и глубоководной седиментационными областями, разделенными склонами с преобладанием гравитационных процессов. В мелководной части внутреннего шельфа преобладают ундо-флювиальные обстановки осадконакопления и нефелоидные с проявлением гравитационных процессов на глубоководном шельфе и в Курильской глубоководной котловине. С этой морфологической зональностью тесно связано и распределение генетических типов четвертичных отложений.

Доклад основан на интерпретации как низкочастотных сейсмических профилей, позволяющих выделить нижнюю границу квартера и определить их мощность, высокочастотных модификаций типа СВВР, вскрывающих структуру четвертичных отложений, так и на данных геологического прободобора и анализа литературных данных, в том числе отобранных длинных колонок (до 10 м).

Одной из важнейших проблем в картировании четвертичных отложений на шельфе является проблема их выделения или разделения отложений квартера и верхнего плиоцена. В Охотском регионе эта проблема связана с соотношением широко распространенных двух сейсмокомплексов (СК) – помырского и дерюгинского, которые отделены от неогеновых отложений отражающими рефлекторами (сейсмогоризонтами): 1Д(ЮП) (на шельфе) и 2 (СП) на склоне. Между собой они разделены сейсмогоризонтами 1Д'(ЮП) и 1(СП) соответственно [1]. Помырский сейсмокомплекс (${}^sN_2-Q_{glpm}$), развитый на шельфе залива Терпения и на склоне Курильской впадины, предположительно сложен глинами, песчаниками и алевролитами. Мощность его до 750 м. Дерюгинский сейсмокомплекс (${}^sQ_{gl-Hdr}$) также по характеру сейсмозаписей имеет существенно глинисто-алевритовый состав. Мощность его может достигать 200 м. В подобном понимании он практически представляет весь четвертичный чехол, за исключением нижней половины гелазия. Проведенный анализ собственных сейсмограмм позволил выделить в присклоновой области Южно-Сахалинского шельфа внутри помырского сейсмоакустического горизонта отражающий горизонт 1Q, который разделил его на два подгоризонта: нижнепомырский и верхнепомырский. По нашему мнению, этот рефлектор залегает в основании толщи гелазия и является в этом случае подошвой четвертичного горизонта. При этом выделенный ранее отражающий рефлектор 1'(ЮД), разделяющий помырский и дерюгинский СК, располагается уже в подошве эоплейстоцена. Данная схема разделения было нами распространена на весь сахалинский склон и склон Курильской котловины, а также на центральную часть Охотского моря.

Еще одна проблема таких регионов, как Охотское море с его разнообразными глубинами и формами рельефа – разнообразие седиментационных обстановок в различных участках моря и, соответственно, различный ход четвертичного седиментогенеза. Важным этапом составления геологической карты четвертичных отложений является структурно-фациальное районирование в пределах листа М-55. На дне изученной акватории можно выделить два крупных района, отличающиеся друг от друга по глубине и мощности покрова рыхлых осадков: Южно-Сахалинский, охватывающий внутренний шельф острова как со стороны Охотского моря, так и небольшого участка залива Терпения, и собственно Охотский, в состав которого входят Сахалинский склон, центральная часть моря и небольшая часть Курило-Камчатской впадины со склоном. Эти два района и были выделены в качестве основных структурно-фациальных зон (СФЗ).

В рамках Южно-Сахалинской зоны были выделены три структурно-фациальные подзоны (СФПЗ), из которых непосредственно к Охотскому морю имеет отношение одна: *СПФЗ шельфовая Сахалинская*. Она охватывает зону внутреннего шельфа Сахалина, ограниченного изобатой 200 м, абразионную площадку в заливе Терпения, а также подводное продолжение погружающегося хребта. В южной части его, на дне развиты преимущественно коренные породы с банками, сформированными морскими моллюсками и продуктами их разрушения. На Охотоморском Сахалинском шельфе преимущественно развит горизонт разнзернистых песков (mv,mfH), а в вершинах бухт залегают маломощные волновые пески.

Охотская структурно-фациальная зона, охватывающая всю остальную часть открытого Охотского моря, включает в себя 5 подзон: 2.1 – Сахалинскую склоновую, 2.2 – Центрально-Охотскую, 2.3 – Южно-Охотскую склоновую, 2.4 – Курильскую (котловинную), 2.5 – Центрально-Охотские возвышенности.

Структурно-фациальная подзона Сахалинская склоновая охватывает пологий восточный склон о-ва Сахалин и частично (на севере) сформирована за счет твердого стока Пра-Амура. Четвертичные отложения представлены разнообразными по генезису (оползневые, оплывающие (слампинг), грязепопотоковые) склоновыми отложениями. Местами, в узких глубоких врезках, могут встречаться отложения грязекаменных и турбидитовых потоков. Мощность всех типов осадков невелика и они подстилаются преимущественно нижними горизонтами дерюгинского СК, который может быть представлен отложениями эоплейстоцена. Мощность всего разреза составляет менее 20 м, что еще раз свидетельствует о сокращенном разрезе четвертичных образований. Поэтому здесь, вероятно, развиты толщи морского декливия, местами расчлененные на оползневые (слампинговые) (mdsIII-H) и потоковые (mdpIII-H) фации, которые с размывом перекрывают отложения дерюгинского СК, представленного

отложениями эоплейстоцена – нижнего неоплейстоцена и даже (вблизи подножья) отложениями вернепомырского сейсмоподкомплеса. Вблизи бровки разрез, по-видимому, сокращенный, и голоценовые осадки непосредственно перекрывают коренной цоколь, как и на внутреннем шельфе.

Структурно-фациальная подзона Центрально-Охотская пространственно совпадает с желобом Макарова и его южным продолжением – желобом Шмидта, вплоть до бровки северного склона Курило-Камчатской впадины. Голоценовый покров непосредственно у подножия склона сложен пелагическим морским нефелоидом с прослоями турбидитовых илистых потоков, поступающих со стороны склона. Большая часть морского дна покрыта морскими пелагическими нефелоидными диатомово-обломочными илами, мощность которых может достигать десятков метров. Это типичные глубоководные терригенно-биогенные осадки. В этой толще выделяются два литостратиграфических подразделения: от голоцена до эоплейстоцена [2]. Граница проводится между верхним и средним неоплейстоценом и обоснована данными био- и магнитостратиграфии. В литологическом плане верхняя толща представлена диатомовыми илами, а ниже располагаются диатомовые глины. Важно, что сокращенный разрез четвертичных отложений в верхней части Сахалинского склона фациально замещается в его нижней части толщей с полным разрезом четвертичных отложений.

Структурно-фациальная подзона Южно-Охотская занимает небольшую площадь в юго-восточном углу планшета и включает крутой борт Курило-Камчатской впадины. Этот склон рассечен каньонообразными ложбинами. Осадки представлены здесь различными фациями склоновых образований, грязекаменными отложениями и турбидитами. Полной ясности в подстилающих горизонтах здесь нет, и условно за это принимаются отложения дерюгинской толщи в ее классическом представлении: от эоплейстоцена до верхнего неоплейстоцена.

Структурно-фациальная подзона Центрально-Охотские возвышенности выделяется на поднятиях в центральной части Охотского моря. Разрезы здесь отличаются сокращенным характером. Верхняя часть разрезов часто начинается с перлювия, а на склонах по данным геоморфологического анализа отмечается большое количество каналов, по которым распространяются зерновые и турбидитовые потоки. Эти отложения, вероятно, представлены редуцированным горизонтом эоплейстоцена – нижнего неоплейстоцена и морскими же отложениями гелазия. В участках сокращенного разреза неогеновые отложения вернепомырского СФЦ и даже подстилающие неогеновые отложения могут выходить на поверхность, которые перекрыты маломощным слоем морского перлювия, сформированного за счет размыва этих пород.

Структурно-фациальная Курильская склоновая подзона охватывает

склон Южно-Курильской котловины. Здесь выделяется сложнопостроенный комплекс гравитационных отложений, включающий в себя морской декливий, морские потоковые и дельтовые турбидиты, а также возможно контуритовые отложения. Эти отложения условно перекрывают осадочные образования дерюгинского сейсмокомплекса, включающего осадки от гелазия до среднего неоплейстоцена.

Структурно-фациальная подзона Курильской котловины занимает совсем маленькое место в юго-восточном углу планшета на глубинах 2000–3000 м и более. В соответствии с легендой соседнего листа, здесь выделяются морской пелагический нефелоид, преимущественно обломочного состава и сформировавшийся за счет турбидитных потоков, поступающих с Курильского склона. Отсутствие любых биостратиграфических данных заставляет в качестве подстилающего горизонта принять нерасчлененные отложения дерюгинского и верхнепомырского сейсмокомплекса, возраст которых в данном случае составляет от гелазия до верхнего неоплейстоцена. Это полностью совпадает со стратиграфической схемой листа М-56 [1]. На дне Курильской впадины, где отсутствуют какие-либо геофизические данные и распространение сюда данных интерпретации сейсмоакустики на верхней части склона Курильской впадины у о. Сахалин не совсем корректно, заставляет нас показать здесь единый контур плиоцен-четвертичных отложений.

Предложенная схема стратиграфии четвертичных отложений южной части Охотского моря является сугубо предварительной, но показывает, сколь сложный характер имеет формирование четвертичного покрова в зависимости от конкретных фациальных условий.

Данный доклад подготовлен в рамках Госзадания № 049-00004-24-00 от 29 декабря 2023 г. на 2024 год и плановый период 2025 и 2026 годов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грецкая Е.В., Петровская Н.А., Рыбак-Франко Ю.В., Митрофанова Л.И. Сеймостратиграфическая схема Охотского моря и Татарского пролива // Геология нефти и газа. 2014. № 6. С. 19–29.
2. Левитан М.А., Лукша В.Л., Толмачева А.В. История седиментации в северной части Охотского моря в течение последних 1.1 млн. лет // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 3. С. 227–246.

Quaternary sedimentation in different areas of the Sea of Okhotsk varies significantly due to both depth variations and shifting sources of detrital material. This report discusses the principles of structural-facies zoning of Quaternary sediments on the seafloor, demonstrating the relationship between specific genetic types of marine sediments and specific subzones of structural-facies zoning.

Соколова Е.А.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: sokolova@ocean.ru)

Сравнение танатоценозов планктонных фораминифер, сформировавшихся на разных палеоглубинах Тихого океана в начале кампанского века

Sokolova E.A.

(Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow)

Comparison of thanatocenoses of planktonic foraminifera formed at different paleodepths of the Pacific Ocean at the beginning of the Campanian Age

Ключевые слова: палеоглубины, сохранность комплекса, растворение, фораминиферы, ювенильные формы, танатоценозы, осадконакопление, шельфовые моря

Изучен видовой состав раковин планктонных фораминифер из образцов кернов семи скважин глубоководного бурения и разреза шельфовых морей Австралии. Возраст отложений датируется ранним кампаном. По составу комплексов планктонных фораминифер и по сохранности их раковин для каждой скважины определено, в пределах какого уровня растворения происходило накопление исходных осадков.

В глубинном распределении планктонных фораминифер (ПФ) наблюдается определенная закономерность. По мнению Л.Ф. Копаевич, распределение меловых ПФ в водной колонке [1] коррелятивно связано с толщиной стенки, размерами и морфологией их раковин. Эта закономерность прослеживается также и в соответствующих танатоценозах.

Танатоценозы планктонных и бентосных фораминифер (БФ), сформировавшихся на разных палеоглубинах (превышающих глубину прижизненного обитания ПФ), тоже отличаются, но этот фактор обусловлен другими причинами – преимущественно растворением.

В соответствии с разработанным в 1998 г. [2] и неоднократно применяемым [3–7] методом определения палеоглубин по составу танатоценоза фораминифер, для каждого изученного образца было установлено, в пределах какого палеоглубинного уровня происходило накопление исходных осадков.

Суть предлагаемого метода [2, 4] состоит в следующем. Раковины ПФ по степени сохранности подразделяются на четыре группы. Для каждой группы введен свой коэффициент сохранности. Для изучаемого образца вычисляется сохранность комплекса раковин ПФ по формуле $S = (K_{ox}N_{ox} + K_xN_x + K_{cNc} + K_{пNп}) : 100\%$, где N – количество раковин ПФ разной сохранности, K – коэффициент сохранности раковин. Сохранность комплекса увеличивается несколько скачкообразно, составляя три уровня. В

пределах первого надлизоклинового уровня, соответствующего палеоглубинам менее 1500 м, сохранность комплексов ПФ колеблется от 55 до 80%. ПФ составляют 60–95% комплекса, из них от 4 до 41% – ювенильные формы (ЮФ). Комплексы фораминифер, характерные для осадков, накапливающихся в пределах второго палеоглубинного уровня (1500–2300 м), на 23–60% состоит из скульптурированных, как правило, крупных раковин ПФ. ЮФ в комплексе очень мало (<4%). Сохранность комплекса составляет 20–55%. В океанических отложениях, образовавшихся в пределах третьего палеоглубинного уровня, то есть на глубине более 2300 м, ПФ составляют не более 23% комплекса. Их раковины очень сильно растворены. Сохранность комплекса ПФ не превышает 20%. ЮФ отсутствуют. Полученные результаты для ряда скважин подтверждаются литературными данными [8].

Материалом для настоящей работы послужили 150 собственноручно отобранных из разреза шельфовых морей Австралии и из кернов скважин, пробуренных в акватории Тихого океана. В каждом образце изучен систематический состав ПФ, что позволило датировать изучаемые отложения началом нижнего кампана (зона *Globotruncanites elevata* по стратиграфической шкале [9]).

В районе Центральной котловины нижнекампанские отложения вскрыты двумя рассматриваемыми в данной работе скважинами: DSDP Site 170 и ODP Site 872B. Осадконакопление в этой акватории происходило, вероятно, ниже уровня лизоклина. Об этом свидетельствует полное отсутствие ЮФ в обоих разрезах. Кроме того, раковины ПФ в скважине 170 отличаются крайне плохой сохранностью ($S=14\%$). Их численность от общего количества фораминифер составляет 16% (таблица). Танатоценоз фораминифер, характеризующийся такими особенностями, сформировался на очень большой палеоглубине, значительно ниже уровня мелового лизоклина – более 4500 м. Палеобатиметрические построения Л.А. Савостина с соавторами [8] подтверждают это предположение. Осадконакопление, по их расчетам, происходило на палеоглубине 4525 м. В выявленном Х.М. Саидовой комплексе БФ, формы, обитавших на глубине 4600 м, составляют 90% [8] (таблица). В осадках, вскрытых скважиной 872B, сохранность ПФ увеличивается до 21%, а численность их раковин возрастает до 22% (таблица). Танатоценоз БФ характеризуется присутствием форм, обитавших на глубине 2800–2900 м. Все это позволяет предположить, что осадконакопление в изученном участке Центральной котловины (скв. 872B) шло в верхней части третьего палеоглубинного уровня (2600–2800 м).

Скважины DSDP Sites 313 и 167 пробурены на значительном расстоянии друг от друга (рисунки). Танатоценозы ПФ, которыми охарактеризованы нижнекампанские отложения, вскрытые этими скважинами, отличаются по систематическому составу ПФ. Различия эти носят климатический характер.

В отложениях скв. 313 развит промежуточный тип танатоценоза, а танатоценоз разреза скв. 167 относится к тетическому типу [10]. Однако сходство между этими комплексами проявляется в следующем. Раковины ПФ составляют 33% (скв. 313) и 37% (скв. 167) (таблица). Раковины ПФ, преимущественно тепловодные *Globotruncanita stuartiformis* (Dalbiez), *G. elevate* (Brotzen), *Globotruncana linneiana* (Orbigny), *G. arca* (Cushman), *G. lapparenti* Brotzen Pes пришли из сантона. *G.hilli* Pessagno, *G. stephensoni* Pessagno, *G. bulloides* Vogler имеют среднюю, реже хорошую сохранность. Сохранность комплекса ПФ скв. 313 составляет 32%, а скв. 167 – 34% (таблица). Количество ЮФ в обоих танатоценозах не превышает 2%. Изученные комплексы фораминифер, вероятно, сформировались в нижней части второго палеоглубинного уровня (табл.). Это предположение подтверждается построениями Л.А. Савостина [8] и фораминиферовым анализом Х.М. Саидовой [8] (таблица).

Таблица. Соотношение палеоглубины и сохранности комплекса ПФ; количества ПФ, ювенильных особей ПФ.

№№ сква- жин	(S) степень сохранност и комплекса ПФ в %	количе- ство в %		палеоглубина осадконакопления в м		
		П Ф	Ю Ф	собственные данные	по БФ[8]	рас- четная [8]
170	14	16	0	>4500 (нижняя часть III палеоглубинного уровня)	4500–4700	4525
872В	21	22	0	2600-2800 (верхняя часть III палеоглубинного уровня)	–	–
313	32	33	2	~2300 (нижняя часть II палеоглубинного уровня)	2400	2075
167	34	37	2	~2200 (нижняя часть II палеоглубинного уровня)	2200	2512
305	56	59	3,3	~1800 (верхняя часть II палеоглубинного уровня)	2000	2400
171	63	75	22	~1200 (нижняя часть I палеоглубинного. уровня)	1200	1200
462А	72	90	37	~500 (средняя часть I палеоглубинного. уровня)	–	–
разрез Перт	80			менее 100 (верхняя часть III палеоглубинного уровня)	–	–

Нижнекампанские отложения вскрыты на Поднятии Шатского скважиной DSDP Site 305. Выявленный комплекс ПФ, также как танатоценоз скв. 313, представлен промежуточным типом [10], и осадконакопление на Поднятии Шатского также происходило в пределах второго палеоглубинного уровня. Однако, сохранность комплекса ПФ увеличилась до 56%, количество ПФ возросло до 59%, ЮФ составили более

3%. Все это позволяет предположить, что осадконакопление на Поднятии Шатского происходило в верхней части второго палеоглубинного уровня (таблица). По БФ [8] палеоглубина в этой акватории составляла 2000 м (таблица).

Несколько южнее в пределах тетической климатической зоны изучаемые отложения вскрыты скважинами DSDP Sites 171 и 462A. Осадконакопление в этих акваториях шло в пределах первого палеоглубинного уровня, что подтверждается данными Х.М. Саидовой [8] по БФ (таблица). В нижней части этого уровня (скв. 171) количество ПФ составляет 75%, в средней части (скв. 462A) доходит до 91%. В разрез скв. 171 растворение было незначительным ($S = 63\%$), а в средней части уровня оно почти не коснулось даже ЮФ. Степень сохранности ПФ составила там 72%. ЮФ присутствуют в разрезах скважин 171 и 462A в количестве 22 и 37% соответственно.

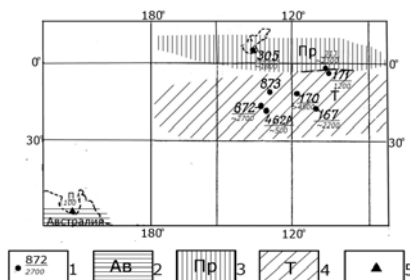


Рисунок. Горизонтальный срез начала раннего кампана. Карта выполнена на палинспастической основе 85 млн. лет [11]. 1— номера скважин и палеоглубина осадконакопления в м; 2— климатические зоны по [10]: 2— австралийская, 3— промежуточная, 4— тетическая; 5—разрез Перт.

Австралийный танатоценоз ПФ из отложений шельфовых морей Австралии (разрез Перт) существенно отличается от всех предыдущих. Это явление обусловлено преимущественно палеоклиматическим фактором. Численность раковин умеренной группы (роды *Globigerinelloides*, *Heterohelix* и *Hedbergella*) составляет 68%, на долю субтропических видов приходится всего 10% [10]. Практически все раковины отличаются хорошей, реже очень хорошей сохранностью. Степень сохранности комплекса составляет 80%, то есть растворение было минимальным. Однако глубоководные формы [1] представлены только ювенильными особями, а количество ПФ снижается (по сравнению с комплексом скважины 462A) до 81%, 41% из них ЮФ (таблица). Перечисленные особенности характерны для танатоценоза, сформировавшегося в верхней части первого палеоглубинного уровня (50–100 м).

По сохранности раковин и составу их комплекса для каждой скважины определено, в пределах какого уровня растворения происходило накопление

исходных осадков.

Автор выражает глубокую благодарность комитету «Curatorial Advisory Board» за передачу образцов кернов глубоководного бурения, без которых данная работа была бы невозможна.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FMWE-2024-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копаевич Л.Ф. Определение палеоглубин на основе анализа комплексов планктонных фораминифер (по материалам верхнемеловых разрезов Закаспия) // Вестн. Моск. ун-та. Отд. геол. 1989. Сер. 4. № 3. С. 25–34.
2. Соколова Е.А. Палеоокеанологические реконструкции Тихого океана для конца позднего мела (маастрихт) по планктонным фораминиферам М.: ВИНТИ, 1998. N 1351-В 98. 174 с.
3. Копаевич Л.Ф., Соколова Е.А. Сравнение комплексов сантонских планктонных фораминифер из скважин Атлантического океана и некоторых эпиконтинентальных бассейнов северного полушария // МОИП. отд. геол. 2003. Т. 78. Вып. 5. С. 60–70.
4. Соколова Е.А. Определение палеоглубин по танатоцнозам маастрихтских фораминифер // Океанология. 1999. Т. 39. № 2. С. 281–287.
5. Соколова Е.А. Определение палеоглубин по танатоцнозам кампанских фораминифер (новые данные) // Тез. докл. XV Международной школы по морской геологии. М.: ГЕОС, 2003. Т. 1. С. 273–274.
6. Соколова Е.А. Определение палеоглубин по танатоценозам сеноманских фораминифер // Материалы XXI Международной школы по морской геологии. М.: ГЕОС, 2015. Т. I. С. 238–243.
7. Sokolova E.A. The definition of paleodepth in thanatocoenoses foraminifera for the early Turonian // Abstract volume 17th Czech-Slovak-Polish Palaeontological Conference. Kraków. 2016. S. 82–83.
8. Савостин Л.А., Волокитина Л.П., Зоненшайн Л.П., Сорохтин О.Г., Саидова Х.М., Седов А.П. Палеобатиметрия Мирового океана в позднем мелу // Океанология. 1980. Т. 20. Вып. 5. С. 871–881.
9. Coccioni R., Premoli Silva I. Revised Upper Albian–Maastrichtian planktonic foraminiferal biostratigraphy and magnetostratigraphy of the classical Tethyan Gubbio section // Newsletters on Stratigraphy. 2015. V. 48. № 1. P. 47–90.
10. Соколова Е.А. Аномальное климатическое явление в низких широтах Тихого океана в кампане по планктонным фораминиферам // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2021. Т. 1. С. 177–181.
11. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Седов А.П. Глобальные палеогеодинимические реконструкции для последних 160 млн. лет. // Геотектоника. 1984. № 3. С. 3–16.

The species composition of planktonic foraminifera shells from core samples of seven deep-sea drilling wells and a section of the shelf seas of Australia was studied. The age of the deposits is dated to the early Campanian. The composition of the planktonic foraminifera complexes and the preservation of their shells for each well determined the level of dissolution within which the accumulation of the initial sediments occurred.

**Сорокин В.М., Росляков А.Г., Ахманов Г.Г., Замотина З.С.,
Старовойтов А.В.**

(МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: vsorok@rambler.ru)

**Формирование неоплейстоценовых осадков на шельфах
северных и южных морей России**

**Sorokin V.M., Roslyakov A.G., Akhmanov G.G.,
Zamotina Z.S., Starovoytov A.V.**

(Lomonosov Moscow State University)

**Formation of Neopleistocene sediments on the shelves of the
northern and southern seas of Russia**

Ключевые слова: неоплейстоцен, голоцен, стратиграфия, сейсмоакустика, моря: Карское, Баренцево, Черное, Каспийское

Выполнен сравнительный анализ неоплейстоцен–голоценовых отложений Баренцева, Карского, Черного и Каспийского морей. Установлено, что их состав и строение определяется близостью к центру оледенения и выражено в разной стратиграфической полноте разрезов, в мощностях, литологическом строении.

1. Баренцево и Карское моря Северного Ледовитого океана, будучи шельфовыми морями, расположены на северных окраинах Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты. Шельфы Северо-западной области Черного моря и Северного Каспия занимают южную окраину Восточно-Европейской и Скифско-Туранскую платформы. Сравнимые бассейны характеризуются сходным тектоническим режимом, который проявляется в четвертичное время слабыми вертикальными движениями, сейсмичностью и вулканической активностью.

2. Главным фактором, определяющим развитие осадочного процесса и формирование толщи четвертичных отложений, является смена ледниковых и межледниковых эпох, с которыми связаны периодические изменения уровней морей, чередование морских и континентальных режимов, интенсивность питания терригенным материалом, вклад биогенного вещества. Кардинальные различия между бассейнами при этом состоят в том, что северные моря испытали непосредственное влияние материковых и островных оледенений, в то время как южные моря, расположенные во внеледниковой зоне, ощутили их косвенное влияние.

3. На дне северных морей присутствуют различные положительные и отрицательные морфоскульптуры, отражающие деятельность ледников в стадии их развития и деградации. Подобные же формы выявлены в толще неоплейстоценовых отложений на разных уровнях. Распространение четвертичных осадков характеризуется мозаичностью в разрезах и по латерали. При этом наибольшей сохранностью отличаются отложения последнего оледенения и послеледниковья, представленные разными

типами ледниковых, флювиальных и морских осадков. Осадки же предшествующих оледенений и межледниковий сохранились только в некоторых местах переуглубленных шельфовых впадин. Вследствие этого мощность четвертичного покрова редко превышает нескольких десятков метров и, как правило, определяется самыми молодыми образованиями последнего ледниково-последледникового цикла.

4. Неоплейстоценовая история Черного моря сочетает чередование изолированных озерных и связанных со Средиземным морем морских бассейнов, существовавших в ледниковые и межледниковые эпохи. Обширный северо-западный шельф то полностью осушался во время регрессий, приводивших к накоплению алювиальных, делювиальных и эоловых континентальных осадков, то заполнялся морскими водами во время трансгрессий, приводящих к формированию максимально разнообразных генетических топов отложений. Частые смены континентальных и морских режимов седиментогенеза привели к формированию сильно редуцированных разрезов с локальным сохранением как морских, так и континентальных элементов, за исключением последнего этапа развития. В результате остаточные мощности неоплейстоценовых составляют от нескольких до первых десятков м.

5. Каспийское море в позднем плейстоцене и голоцене представляло собой солоноватоводный водоем с небольшими колебаниями солености и трансгрессивными и регрессивными этапами со сложной корреляцией со стадиями оледенений и межледниковий. Особенностью Северного Каспия является значительное поступление терригенного аллювиального (Волга, Урал и другие реки) и эолового материала. При высоких уровнях до +80 м выше современного положения и удалении устьев рек к северу во время трансгрессий на шельфе накапливались преимущественно морские глинистые осадки. При низких уровнях в регрессии до -50 м ниже современного положения большая часть шельфа осушалась, происходил размыв и формировался комплекс континентальных отложений. Имеющиеся разрезы, тем не менее, отличаются максимальной полнотой с присутствием всех стратиграфических горизонтов. Суммарные мощности неоплейстоценовых осадков достигают 20–30 м и более.

6. Выполненный сравнительный анализ показал, что неоплейстоценовые и голоценовые шельфовые отложения, формировавшиеся в сходных тектонических обстановках, кардинально различались по климатическим условиям седиментации, связанных с положением морей по отношению к центру материкового оледенения. Это определило разные параметры осадочного слоя: мощности, стратиграфическую полноту, сочетании морских и континентальных типов осадков, их состав и свойства.

Analysis of the Quaternary deposits of the Barents, Kara, Black and Caspian Seas has been carried out. It has been established that their composition and structure are determined by the proximity to the center of glaciation and are expressed in different stratigraphic completeness of sections, in thickness, and lithological structure.

Сыромятников К.В.¹, Левитан М.А.¹, Габдуллин Р.Р.²

(¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, e-mail: sykirv@gmail.com; ²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова г. Москва, e-mail: gabdullin@geokhi.ru)

Литолого-фациальное районирование Курильской котловины и северо-западной части Тихого океана на основе геохимических и гранулометрических данных с применением методов математической статистики

Syromyatnikov K.V.¹, Levitan M.A.¹, Gabdullin R.R.²

(¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow;

²Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow,

³Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Lithologic-facial zoning of the Kuril Basin and the Northwest Pacific Ocean on the basis of geochemical and granulometric data with application of mathematical statistics methods

Ключевые слова: современные донные осадки, Охотское море, Тихий океан, фациальная структура, корреляционный анализ Пирсона, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, гидродинамика, температуры поверхности моря

На основе обработки гранулометрических и геохимических данных [1] с помощью методов статистического анализа выполнено литолого-фациальное районирование южной части Охотского моря и северо-западной части Тихого океана. В работе применены методы корреляционного анализа Пирсона в пакете Excel [2], однофакторного дисперсионного анализа и одномерного регрессионного анализа в программе Statgraphics Plus v.5.

На основании полученных результатов выделены три литолого-фациальные области: Курильская котловина, Курило-Камчатский глубоководный желоб и северо-западная часть Тихого океана. В пределах каждой из них определены две фациальные подобласти.

Для Курильской котловины характерна отчетливая градация осадков: на северном склоне на глубинах 767–2426 м доминируют зеленовато-серые алевритовые и пелитово-алевритовые терригенные илы, богатые диатомеями, тогда как на глубинах свыше 3000 м осадки имеют меньшую примесь алевритовой фракции. Песчаная фракция отсутствует. Корреляционный анализ выявил положительную связь Si и Ca, и незначительную корреляцию Sc и Sr с алевритовой фракцией, а пелита с K, Nb, Cs, Th, Pb, Rb, Zn и Zr. Геохимические признаки (высокие значения Si/Al, Th и C_{орг}) указывают на биогенное и терригенное происхождение вещества, при незначительном вулканогенном вкладе [3]. Это подтверждается пониженными содержаниями Fe и Ti и ранее

зафиксированными наблюдениями [4].

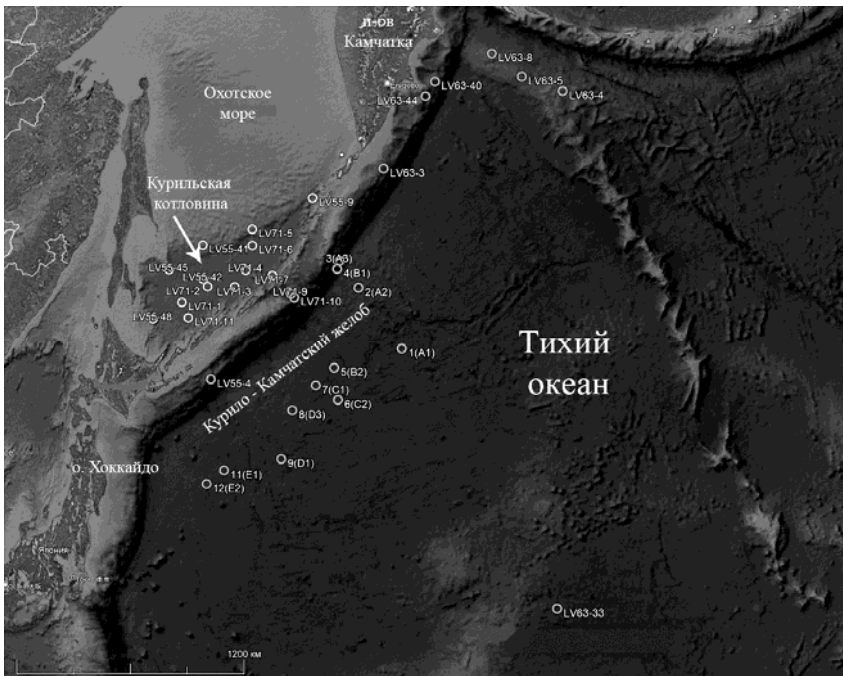


Рисунок. Карта расположения станций отбора проб [1]

Циркуляция вод в Курильской котловине определяется антициклоническим круговоротом, обусловленным действием течения Соя [5]. Установлена зависимость между температурой поверхностной воды и содержанием фракций: положительная с пелитовой, отрицательная – с алевритовой ($P < 0.05$).

Данная зависимость, по-видимому, обусловлена различиями в гидродинамическом режиме и физических свойствах соответствующих типов осадков. Пелитовые осадки, как правило, формируются в малоподвижных, изолированных условиях, характеризующихся слабым перемешиванием водных масс и повышенной теплоемкостью придонной среды. Это способствует более длительному сохранению тепла в поверхностных слоях. В то же время алевриты, как правило, связаны с участками с большей динамикой – мелководьями с активным течением или волновым воздействием, где перемешивание воды способствует более интенсивному отводу тепла от поверхности. Таким образом, литологический состав донных осадков может опосредованно отражать температурный режим поверхностной воды через характеристики гидродинамической обстановки осадконакопления.

Кроме того, хорошо известно воздействие придонных течений на осадки склонов различного генезиса, что приводит к вымыванию пелитовых фракций. Вероятно, одной из причин отмеченной выше закономерности является сохранение круговорота Курильской котловины вглубь водной толщи, следствием чего является удаление части пелитовой фракции из донных осадков на склоне котловины под воздействием более сильных придонных течений, чем на дне абиссальной равнины. Нельзя полностью исключить влияние и других природных факторов на формирование отмеченной закономерности. Результаты согласуются с известными механизмами транспорта осадочного вещества в глубоководных морских бассейнах [6].

Во второй литолого-фациальной области – Курило-Камчатском глубоководном желобе – выявлены фациальные различия между островным склоном и тальвегом. Осадки склона на глубинах до 2927 м включают алевроитовые пески и миктиты, в то время как в тальвеге (4722–5767 м) преобладают пелитово-алевритовые илы. Песчаная фракция, вероятно, поступает в результате гравитационных процессов (оползней, дебригов). Геохимически для осадков характерны средние значения Si/Al и $С_{орг}$, минимальное содержание Th , что указывает на слабый терригенный вклад, но максимальные значения Fe и Ti подтверждают активную вулканогенную поставку [1, 7].

Основной вклад осадочного вещества формируется за счет вулканов Курил и Камчатки, а также гравитационных процессов и течения вдоль островной дуги. Первичная продукция в верхнем слое воды сопоставима с таковой в Курильской котловине [8].

Третья область — северо-западная часть Тихого океана — подразделена на Северо-Западную глубоководную котловину и подводное поднятие Обручева-Детройта. В первой подзоне на глубинах 4869–5412 м встречаются коричневые илы, близкие по геохимическим характеристикам к плейстоценовым пелагическим глинам [3], с низкими значениями Si/Al , Th , $С_{орг}$, средними Ti и Fe и высокими Mn . Эти особенности соответствуют условиям пелагического осадконакопления при низкой биопродуктивности и удаленности от источников терригенного материала [9].

На поднятии Обручева-Детройта (глубины 1465–3131 м) развиты песчано-пелитовые алевроиты светло-коричневого цвета. Здесь наблюдаются высокие значения Th , пониженные Ti , Mn и $С_{орг}$, что может быть связано с близостью к Алеутским островам и нахождением выше критической глубины карбонатакопления. Содержание $CaCO_3$ варьирует от 10 до 27.5 %, обусловленное присутствием фораминифер и усиленной гидродинамической активностью, типичной для гребней подводных структур [1].

Фациальные различия между подобластями подтверждаются результатами дисперсионного анализа по показателям Si/Al , Fe , Ti , Th и $С_{орг}$

($P < 0.05$). Курильская котловина характеризуется максимальными значениями $C_{\text{орг}}$ и Th при минимальных Ti и Fe, в отличие от Курило-Камчатского желоба, где геохимия определяется вулканизмом. В северо-западной части Тихого океана отмечено понижение $C_{\text{орг}}$ и Th, но повышение Mn, что согласуется с удаленностью от материковых источников и низкой биопродуктивностью.

Таким образом, выполненное районирование позволило выделить: 1) абиссальную равнину и северный склон Курильской котловины, различающиеся по гранулометрическому и геохимическому составу, в связи с особенностями циркуляции водных масс и уровнем первичной биологической продуктивности; 2) островной склон и тальвег Курило-Камчатского глубоководного желоба, фациальные различия между которыми обусловлены рельефом дна и активностью гравитационных процессов; 3) Северо-Западную глубоководную котловину и подводное поднятие Обручева–Детройта в северо-западной части Тихого океана, различающиеся по степени поступления биогенного и терригенного материала, положению критической глубины карбоната накопления и геохимическим характеристикам донных осадков.

Результаты статистической обработки подтвердили значимость фациальных различий между районами осадконакопления, а использование фациальных индикаторов (гранулометрии осадков, Si/Al, Fe, Ti, Th, $C_{\text{орг}}$) позволило обосновать обобщенную модель литолого-фациального районирования изученного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саттарова В.В., Аксентов К.И. Геохимия редкоземельных элементов в поверхностном слое донных осадков северо-западной Пацифики // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 2. С. 179–193.
2. Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel. М.: Вильямс, 2005.
3. Левитан М.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Тихого океана // Литология и полез. ископаемые. 2025. № 3. С. 243–258.
4. Страхов Н.М. О воздействии пирокластики на геохимию осадков Охотского моря // Химия океана. Т. 2. М.: Наука, 1979. С. 196–200.
5. Верхунов А.В. Развитие представлений о крупномасштабной циркуляции Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 8–19.
6. Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. М.: МГУ, 1993. 406 с.
7. Гнибиденко Г.С., Быкова Т.Г., Веселов О.В. Тектоника Курило-Камчатского желоба. М.: Наука, 1980.
8. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnol. Oceanogr. 1997. V. 42. P. 1–20.

9. Ziegler C.L. et al. Resolving eolian, volcanogenic, and authigenic components in pelagic sediments from the Pacific Ocean // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 254. P. 416–432.

This study presents the litho-facies zoning of the southern Okhotsk Sea and the northwestern Pacific based on granulometric and geochemical data analyzed using statistical methods. Three major litho-facies regions were identified: the Kuril Basin, the Kuril-Kamchatka Trench, and the northwestern Pacific. Each region comprises two facies subzones differing in sediment composition and depositional environment. Key controlling factors include primary productivity, terrigenous and volcanogenic input, water column dynamics, and geomorphology. Statistical analysis reliably confirms the observed facies differentiation.

**Шилова О.С.¹, Зарецкая Н.Е.², Репкина Т.Ю.²,
Луговой Н.Н.^{1,2}, Романенко Ф.А.¹**

(¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Географический факультет, г. Москва, e-mail: o.olyunina@mail.ru; ²Институт
географии РАН, г. Москва)

Следы голоценовой трансгрессии в разрезах террас Терского берега Белого моря

**Shilova O.S.¹, Zaretskaya N.E.², Repkina T.Yu.²,
Lugovoy N.N.^{1,2}, Romanenko F.A.¹**

(¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow; ²Institute of
Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow)

Traces of the Holocene transgression in the sedimentary sequences of the terraces of the Tersky coast, White Sea

Ключевые слова: уровень моря, голоцен, Белое море, диатомовый анализ,
радиоуглеродный анализ

Изучено строение осадочного чехла террас Терского берега Белого моря, выполнены радиоуглеродное датирование и диатомовый анализ отложений. Выделено 3 типа голоценовых разрезов, отмечены мозаичность строения одновысотных поверхностей и более раннее начало позднеголоценовой регрессии по сравнению с юго-восточным берегом Горла Белого моря.

Сведения о террасах побережья Белого моря к востоку от устья р. Варзуги до настоящего времени остаются фрагментарными. М.А. Лавровой [1] по аналогии с западным Беломорьем выделены лестницы голоценовых террас (до 6–7 в устьевых частях долин рек), которые на основании их высотного положения, литологии отложений и немногочисленных данных аналитических исследований соотносились с голоценовыми трансгрессиями и регрессиями Портландия, Литторина, Фолас, Тапес I и II, Тривия. Максимальная высота распространения голоценовых отложений понижается с запада на восток и составляет, по мнению М.А. Лавровой, от 75 м в долине р. Варзуга до 32 м в долине р. Пялица. Дальнейшие исследования [2] показали, что эта высота завышена. В строении ряда террас отмечены погребенные торфяные и почвенные горизонты, к которым приурочены неолитические стоянки, что свидетельствует о сменах направленности изменений уровня моря в голоцене. Более поздние сводки отсутствуют, а сведения о возрасте осадочного чехла террас и отложений одноуровневых озерных котловин единичны [3–5]. Приведенные выше работы основывались на концепциях поздней дегляциации, существования приледникового водоема в бассейне Белого моря вплоть до пребореального времени и развития на протяжении голоцена большого числа морских трансгрессий и регрессий. Между тем, за прошедшие полвека

представления о палеогеографии региона претерпели существенные изменения. Получены свидетельства более ранней дегляциации Кольского полуострова [6], согласно которым освобождение Горла Белого моря и Терского берега ото льда произошло ранее 14 тыс. л.н. Изменения уровня моря на протяжении позднеледникового и голоцена, по современным представлениям, включают позднеледниковую гляциоэвстатическую трансгрессию, регрессию начала голоцена, связанную с гляциоизостатическим поднятием территории, эвстатическую трансгрессию Тапес на фоне ослабления гляциоизостатического поднятия с конца раннего голоцена и позднеголоценовую регрессию [7].

Целью данной работы является представление новых данных о строении осадочного чехла террас Терского берега Белого моря, данных численного датирования и диатомового анализа отложений и их интерпретация в контексте современных представлений о палеогеографии региона в голоцене. Материалы были получены в ходе комплексных исследований Терского берега (северо-западного побережья пролива Горло от устья р. Чаваньга до устья р. Пулоньга) в 2017-2018 гг. [8]. Радиоуглеродное датирование выполнено в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии Геологического института РАН, диатомовый анализ – в НИЛ геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

В ходе полевых работ, включавших геоморфологическое профилирование, было выделено 2 уровня террасовидных поверхностей, отличающихся по морфологии и генезису рельефа, разделенные отчетливым абразионным уступом, выработанным в отложениях ледникового комплекса или коренных породах. Верхний уровень (от 25–45 м до 10–30 м н.у.м., понижаясь с запада на восток) включает плоские и пологоволнистые заболоченные террасовидные поверхности с многочисленными криогенными формами и без следов «морской» обработки рельефа. К нижнему уровню (от <15–20 м н.у.м. западе до <7–10 м н.у.м., на востоке) отнесены аккумулятивные и/или абразионные формы берегового рельефа, близкие по строению к формирующимся на современных берегах.

В районе устья р. Чаваньга изучено два разреза. Террасовидная поверхность высотой 30 м имеет торфяной покров мощностью 5 м, перекрывающий сизо-серый мелко-тонкозернистый песок с зернами гравия. Начало накопления торфа датируется 9.8–9.5 тыс. кал. л.н. Терраса высотой 12 м покольная: коренные породы перекрыты 2-м толщей торфа возрастом 4.3–4.2 тыс. кал. л. Данные диатомового анализа подтверждают наличие перерыва в осадконакоплении и отсутствие связи с морем в начале заболачивания осушенных ранее поверхностей. Ранее [5] в разрезе террасы высотой 20–23 м в устье р. Чаваньга м вблизи подошвы торфа мощностью 3 м и возрастом 8.6–8.4 тыс. кал. л. была отмечена примесь морских диатомей при доминировании озерно-болотных видов, свидетельствующая о наличии

штормовых заплесков.

В разрезе террасы высотой 30 м к северо-востоку от устья р. Стрельна вскрывается 4-м толща торфа, подстилаемого глиной со щебнем и валунами. Подошва торфа датирована 10–9.5 тыс. кал. л.н. В кровле глины и подошве торфа доминирует пресноводный аэрофильный вид *Pinnularia rupestris*, характерный для низкоминерализованных вод и периодически увлажненных местообитаний. Таким образом, данные диатомового анализа подтверждают эрозионный характер границы торфа и глины и формирование торфяника в результате заболачивания сформировавшейся раньше поверхности. В 15 см выше подошвы в торфе отмечено увеличение до 15% доли типичных прибрежно-морских видов (включая галофилов, мезогалофилов и полигалофилов). При этом сохранность тонких створок свидетельствует об их автохтонном происхождении. Состав диатомей свидетельствует если не о затоплении морскими водами, то о близком положении уровня моря в то время, не смотря на существенную абсолютную высоту поверхности.

В районе устья р. Чапома изучено несколько террасовых уровней. Поверхность высотой 22 м сложена 3-м толщиной торфа возрастом 10.4–10.3 тыс. кал. л., по-видимому, с размывом перекрывающего коричневатого-серые суглинки. Диатомовые ассоциации начальных стадий торфообразования представлены исключительно пресноводными видами. В разрезе террасы высотой 10–12 м к востоку от устья р. Чапома вскрывается слоистый опесчаненный алеврит, вверх по разрезу постепенно переходящий в торф. Возраст переходного горизонта около 5 тыс.л. Диатомовый анализ показывает постепенный переход от морских литоральных диатомовых ассоциаций к пресноводным болотным. Сходный разрез описан в устье р. Чапомка: поверхность высотой 12 м сложена сизо-серым слабо опесчаненным алевритом, без видимых несогласий сменяющимся 2-м толщиной торфа возрастом 5.0–4.8 тыс. кал. л.

Разрез близ устья р. Пялица (10.5 м) сходен по строению с разрезом Стрельны: 3-м толща торфа возрастом 9.5–9.7 тыс. кал. л. подстилается суглинками, в верхней части оторфованными. Суглинки содержат единичные створки пресноводных видов диатомей и большое количество цист золотистых водорослей, что говорит об осадконакоплении в пресноводном олиготрофном или ультраолиготрофном водоеме, в достаточно суровых климатических условиях. В торфе в 10–15 см выше подошвы появляются створки морских видов диатомей, обладающих грубым панцирем и являющихся характерным компонентом вдольберегового разноса. Вероятно, уровень моря в то время был близок, но менее 6.5 м. В этом же районе в разрезе террасы высотой 5 м на глубине 2.7 м вскрыты погребенный торф, датированный 8.4–8.3 тыс. кал. л.н.

Разрез террасы высотой 7 м близ устья р. Пулонга включает 2.2 м торфа, подстилаемого слоистыми торфяно-песчаными осадками. К кровле

последних приурочена смена морских диатомовых ассоциаций пресноводными, произошедшая 6.5–6.4 тыс. кал. л.н.

Таким образом, для верхнего уровня террасовидных поверхностей характерно начало торфонакопления в раннем голоцене (10.4–9.5 тыс. кал. л.н.). Диатомовые ассоциации представлены только пресноводными видами. Возраст подошвы торфяников на террасах нижнего уровня варьируется от раннеголоценового до позднеголоценового с двумя периодами площадного торфообразования – 9.7–8.4 и 5.0–3.9 тыс. кал. л.н. Для аккумулятивных террас (Чапома, 10–12 м, Пулоньга) данные диатомового анализа подтверждают морской генезис подстилающих торф отложений.

Можно выделить 3 основных типа разреза осадочного чехла террас. Первый тип («континентальный»: Чаваньга, 12 м и 30 м, Чапома, 22 м) отмечен как для высоких террасовых уровней, так и для низких абразионных террас и характеризуется торфонакоплением на осушенных ранее поверхностях и исключительно пресноводным составом диатомовых ассоциаций. Формирование торфяников в разрезах второго типа («трансгрессивный»: Чаваньга, 21 м [5], Стрельна, Пялица, 10.5 м) связано с началом развития трансгрессии Тапес и, вероятно, общим подъемом уровня грунтовых вод в конце раннего голоцена. Эти поверхности не затоплялись морскими водами в голоцене, однако близкое положение уровня моря проявилось в примеси морских диатомей в составе пресноводных диатомовых ассоциаций. Третий тип разреза («регрессивный»: Чапома, 12 м, Чапомка, Пулоньга), отмеченный для аккумулятивных террас нижнего уровня, связан с окончанием среднеголоценовой трансгрессии и характеризуется сменой морских диатомовых ассоциаций пресноводными при постепенном понижении уровня моря.

Несмотря на фрагментарность данных, можно отметить несколько характерных черт: выраженное понижение террасовых уровней в восточном направлении; мозаичность строения одновысотных поверхностей с разрезами нескольких типов, что может быть связано с блоковой тектоникой; кратковременные и менее выраженные переходные горизонты и более раннее начало позднеголоценовой регрессии по сравнению с юго-восточным берегом Горла Белого моря [9]. Последнее, по-видимому, связано с большими скоростями тектонического поднятия в голоцене.

Диатомовый анализ и интерпретация данных выполнены в рамках ГЗ МГУ имени М.В.Ломоносова № 121051100167-1, радиоуглеродное датирование – в рамках ГЗ ИГ РАН № FMWS-2024-0003, геоморфологические исследования – в рамках ГЗ ИГ РАН № FMWS-2024-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврова М.А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 233 с.
2. Кошечкин Б.И., Каган Л.Я., Кудлаева А.Л. и др. Береговые образования поздне- и послеледниковых морских бассейнов на юге Кольского полуострова // Палеогеография и морфоструктуры Кольского полуострова. Л. Изд-во: Наука, 1973. С. 87–131.
3. Арсланов Х.А., Кошечкин Б.И., Чернов Б.С. Абсолютная хронология осадков поздне- и послеледниковых морских бассейнов на Кольском п-ове // Вестник ЛГУ. Серия геолого-географическая. 1974. № 12. Вып. 2. С. 132–138.
4. Евзеров В.Я., Корсакова О.П., Колька В.В. История развития морских бассейнов в Беломорской депрессии за последние 130 тысяч лет (состояние вопроса и перспективы исследований) // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 54–65.
5. Агафонова Е.А., Полякова Е.И., Романенко Ф.А. Диатомовые водоросли в голоценовых отложениях Терского берега Белого моря в связи с историей его развития в послеледниковое время // Арктика и Антарктика. 2020. № 2. С. 1–16.
6. Вашков А.А., Носова О.Ю., Корсакова О.П., Толстобров Д.С. Динамика последнего ледникового покрова в южной части Кольского региона // Морские и озерные бассейны восточной периферии Балтийского щита в четвертичное время: Материалы Всероссийской конференции и полевого симпозиума (г. Апатиты, 10–15 сентября, 2024). Апатиты, 2024. С. 10–13.
7. Корсакова О.П. Побережье Белого моря в пределах фенноскандинавского кристаллического щита в неоплейстоцене и голоцене // Известия РАН. Сер. географическая. 2022. Т. 86. № 6. С. 883–897.
8. Зарецкая Н.Е., Корсакова О.П., Шварев С.В. и др. Новые исследования Терского берега Белого моря: геохронология, стратиграфия, палеосейсмология, история развития побережья в позднем плейстоцене и голоцене // Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 64–70.
9. Шилова О.С., Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Голоценовые отложения юго-восточного побережья Горла Белого моря: новые данные диатомового и радиоуглеродного анализов // Докл. РАН. 2019. Т. 488. № 6. С. 661–666.

The structure of the sedimentary sequences of the terraces of the Tersky coast of the White Sea was studied. According to radiocarbon dating and diatom analysis three types of sediment sections were identified. The mosaic structure of terrace sediments and an earlier onset of the Late Holocene regression compared to the southeastern coast of the Gorlo Strait of the White Sea were revealed.

**Bubenshchikova N.¹, Ponomareva V.², Portnyagin M.³,
Nürnberg D.³**

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, e-mail: bubenshchikova.nv@ocean.ru;

²Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky;

³GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany)

Tephrostratigraphy of Late Pleistocene sediments of Minnetonka Seamount of Emperor Seamount Chain (North Pacific)

**Бубенщикова Н.¹, Пономарева В.², Портнягин М.³,
Нюрнберг Д.³**

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ²Институт
вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский; ³ГЕОМАР
Гельмгольц центр океанологических исследований Киль, Германия)

Тефростратиграфия позднеплейстоценовых отложений подводной горы Миннетонка Императорского хребта (Северная Пацифика)

Keywords: tephra, Late Pleistocene, glass geochemistry, stable isotope analysis, North Pacific

This study presents a first tephra sequence for Late Pleistocene sediments of Minnetonka Seamount of the Emperor Seamount Chain. The sequence is built on major and trace element glass geochemistry of twelve tephra and five cryptotephra preserved in sediments of core SO264-55-1. The ash deposits are dated with the help of the core oxygen isotope-based age model.

Numerous tephra layers, interbedded in sediments of the Emperor Seamount Chain (ESC) and related to the past activity within the Japan, Kurile and Kamchatka volcanic arcs, may improve stratigraphy and correlation of sediments of the North West (NW) Pacific and adjacent land. Recent studies provided tephrostratigraphic frameworks for Mediji Rise and Detroit Seamount of the high-latitude part of the ESC [1–3]. In this study, we identified, geochemically characterised and dated tephra and cryptotephra from Late Pleistocene sediments of core SO264-55-1 from Minnetonka Seamount of the ESC. The core site is to the southeast of the known tephra sequences [1–3] that promises the improvement of the mid-latitude tephrostratigraphy of the ESC. Also, the core site is to the east of Kurile Islands and to the southeast of Kamchatka that provides an opportunity to study past variations in the Kurile and Kamchatka ash plumes to the NW Pacific.

The 16.11 m – long core SO264-55-1 (47°10.542N; 169° 25.292E) was recovered from a 2936 m water depth at Minnetonka Seamount during the R/V “Sonne-Emperor” cruise SO264 held in the North Pacific in 2018 [4]. The core SO264-55-1 sediments cover from ~6.8 to 450 ka according to AMS ¹⁴C dating,

XRF- and stable oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$)- based stratigraphy [5, 6]. The core SO264-55-1 average sedimentation rate is unusually high (~3.6 cm/ kyr) being a result of accumulation of sediments protected from a mid-depth current activity [7]. All the above mentioned features make the core a unique archive for creating a first Late Pleistocene tephra sequence for the mid-latitude NW Pacific.

In core SO246-55-1, visible tephra layers were detected during on-board lithological description [1] and post-cruise analysis of high-resolution XRF-retrieved K/Ti and K/Fe records [2]. In total, twelve 1.5 to 13.5 cm -thick tephra layers, forming the prominent concurrent maxima or minima in the K/Ti and K/Fe records, were recognized and sampled. In addition, using the inconspicuous concurrent maxima or minima in the K/Ti and K/Fe records as a proxy for presence of invisible by naked eyes volcanic glass in sediments, we identified and sampled glass enriched horizons (potential cryptotephra).

Major elements in volcanic glass shards from 33 ash samples were analyzed at the GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (Germany) using JEOL JXA 8200 EPM equipped with 5 wave-length dispersive spectrometers. Then, 17 samples, representing all the identified tephra and cryptotephra, were analyzed for the trace element compositions of glass shards at the Institute of Geosciences, Christian-Albrecht University of Kiel (Germany) using Agilent 8900 triple quadrupole ICP-MS. To establish the provenance and correlations of the core ash deposits, we compared their geochemical characteristics to those of proximal pyroclastic deposits on Kamchatka [8]; distal tephra from terrestrial sites and marine cores in the NW Pacific region [1, 2, 3].

The previous core SO264-55-1 benthic $\delta^{18}\text{O}$ record was constructed based on $\delta^{18}\text{O}$ values on *Uvigerina* (U.) *peregrina* and *U. senticosa* [5]. In order to detail the $\delta^{18}\text{O}$ record, we took additional sediment samples and collected *U. auberiana* and *U. peregrina* and in case of their absence other species. The $\delta^{18}\text{O}$ measurements were performed at GEOMAR using a Finnigan MAT 253 massspectrometer coupled to an automatic Kiel carbonate preparation line. In total, we obtained 179 $\delta^{18}\text{O}$ measurements for 147 samples. We constructed the composite $\delta^{18}\text{O}$ record by using uncorrected values on *Uvigerina* spp. and corrected values on all other measured species in the core. We refined depth-age control points for core SO264-55-1 correlating its composite $\delta^{18}\text{O}$ record to LR04 stack [9]. Ages of the ash deposits were calculated by linear interpolation between the new depth-age control points.

Twelve tephra (Mt1 to Mt12) and five cryptotephra (Mcr1 to Mcr5) from core SO264-55-1 were characterised with 510 EMPA and 135 LA-ICP-MS analyses of individual glass shards. The glass compositions vary from basaltic andesite to rhyolite (55.86-78.63% SiO_2) and from low-K to high-K series (Figure 1a). Most of glasses fall within the Kamchatka composition field rather than the known Kurile field. At the same time, almost all Kamchatka glasses have chlorine contents below 0.2%, with exception of those from the most southern Kamchatka volcanos such as Pauzhetka (Figure 1b) [7].

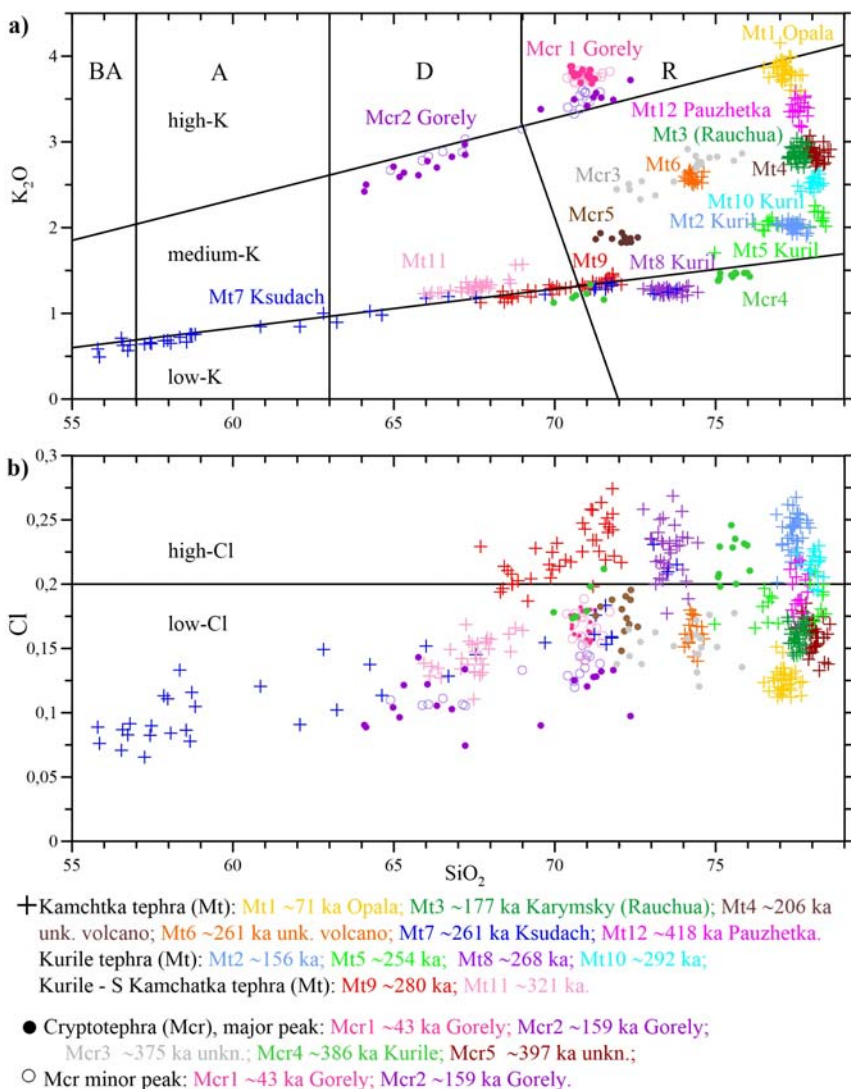


Figure 1. Major elemental compositions for single glass shards from tephras (Mt) 1 to Mt12 and cryptotephra (Mcr) 1 to 5 of core SO264-55-1. The source volcanic arcs/ volcanos are defined based on similarity in the glass geochemistry. The ages are derived from the $\delta^{18}O$ -based stratigraphy of the core. a: Solid lines divide fields of low- K_2O , medium- K_2O , and high- K_2O basalts (B), basaltic andesites (BA), andesites (A), dacites (D), and rhyolites (R). b: High-Cl contents correspond to Kurile arc, Low-Cl – to Kamchatka arc.

A somewhat different from the known Kamchatka glass compositions (i.e., higher chlorine >0.2% contents) allowed us to distinguish those from the Kurile arcs.

Tephra Mt12 from core SO264-55-1 has been earlier linked to the widespread ~418 ka Pauzhetka tephra erupted from Pauzhetka caldera in South Kamchatka [7]. Further comparison with proximal Kamchatka deposits [8] allowed us to define origin of seven more ash deposits of core SO264-55-1 with the activity within the Kamchatka volcanic arc. These are the following five tephtras and two cryptotephtras. The ~71 ka tephtra Mt1 is correlated to pyroclastic deposit of Opala caldera in South Kamchatka [7]. Tephtra Mt3 matches the widespread ~177 ka Rauchua found on the Arctic coast, Lake El'gygytyn, Shirshov Ridge in the Bering Sea and Meiji Rise in the NW Pacific. The Rauchua tephtra has been related to Karymsky volcanic center in Kamchatka [10] and we assume the same source for tephtra Mt3. The ~206 ka tephtra Mt4 is correlated with thick pumice tuff from unknown volcano in South Kamchatka [7]. The next two close in time ~261 ka tephtras Mt6 and Mt7 have glasses geochemically similar to the Kamchatkan glasses. Also, the ~261 ka tephtra Mt7 matches Holocene deposit from Ksudach volcanic center in South Kamchatka [7] and, thus, it is suggested to belong to the earlier unknown pre-Holocene eruption from this volcano. Cryptotephtra Mcr1 matches Gorely tephtra, which is dated in the range from 28 to 44 ka (here is 43 ka) and found in numerous terrestrial outcrops on Chukotka and Kamchatka and marine cores in the NW Pacific. The Gorely tephtra's provenance is defined basing on its similarity to pyroclastic deposit of the Gorely eruptive center in South Kamchatka [7]. The ~159 ka cryptotephtra Mcr2 is the second ash belonging to Gorely volcano in core SO264-55-1.

The other four tephtras Mt2 ~156 ka, Mt5 ~254 ka, Mt8 ~268 ka and Mt10 ~292 ka and one cryptotephtra ~386 ka Mcr4 are ascribed to the Kurile arc based on their specific major and trace element glass compositions, in particular high (>0.2%) chlorine contents (Figure 1b). The provenance of the last two tephtras Mt9 ~280 ka and Mt5 ~321 ka, and two cryptotephtras Mcr3 ~375 ka, and Mcr5 ~397 ka are related to a part of Kurile – South Kamchatka volcanic arcs.

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation grant № FMWE-2024-0020.

REFERENCES

1. Derkachev A.N., Gorbarenko S.A., Ponomareva V.V. et al. Middle to late Pleistocene record of explosive volcanic eruptions in marine sediments offshore Kamchatka (Meiji Rise, NW Pacific) // 2020. Journal of Quaternary Science. V. 35. P. 362–379.
2. Derkachev A.N., Gorbarenko S.A., Portnyagin M. et al. Tephrostratigraphy of Pleistocene-Holocene deposits from the Detroit Rise eastern slope (northwestern Pacific) // Frontiers in Earth Science 2023. V. 10. 971404.

3. Ponomareva V.V., Portnyagin M.V., Bubenshchikova N.V. et al. A 6.2 Ma-long record of major explosive eruptions from the NW Pacific volcanic arcs based on the offshore tephra sequences on the northern tip of the Emperor Seamount Chain // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2023. V. 24. e2023GC011126.
4. Nürnberg D. (Ed.) Cruise report SO264-SONNE-EMPEROR: the PlioPleistocene to Holocene Development of the pelagic North Pacific from surface to depth – Assessing its role for the global Carbon Budget and Earth's climate, Suva (Fiji) – Yokohama (Japan), 2018. 30.6. – 24.8 // *GEOMAR Report N. Ser 2020*. V. 46. 284 p.
5. Langemann L. North Pacific Deep Water circulation during the last 160 ka – Implications for the marine carbon pool and atmospheric CO₂ changes. Master Thesis. 2021. Universität Bremen. 107 p.
6. Chao W., Jacobi L., Niederbockstruck B. et al. XRF Down-Core Scanning Data, Benthic Oxygen Isotope, Sand Fraction and Geochemistry Data of Sediment Cores from the Subarctic Northwest Pacific during the Last 500,000 Years // *PANGAEA*. 2023. doi.org/10.1594/PANGAEA.955877.
7. Bubenshchikova N., Ponomareva V., Portnyagin M., et al. The Puzhetka tephra (South Kamchatka): A key middle Pleistocene isochron for the Northwest Pacific and Okhotsk Sea sediments // *Quaternary Geochronology*. 2024. V. 79. 101476.
8. Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al. TephraKam: Geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. P. 469–486.
9. Lisiecki L.E., Raymo M.A. Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic ¹⁸O records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20. PA1003.
10. Ponomareva V.V., Portnyagin M.V., Derkachev A.N., et al. Identification of a widespread Kamchatkan tephra: a middle Pleistocene tie-point between Arctic and Pacific paleoclimatic records // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. № 14. P. 3538–3543.

В этом исследовании представлена первая последовательность тефр из позднелейстоценовых отложений колонки SO264-55-1 с подводной горы Миннетонка Императорского хребта. Двенадцать тефр и пять криптотефр изучены с точки зрения геохимического состава вулканических стекол при помощи электронного анализа. Возраст пеплов определен при помощи изотопно-кислородной возрастной модели колонки.

***НАНО- И МИКРОЧАСТИЦЫ,
ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ
(АТМО-, КРИО-, ГИДРО-, ЛИТО-,
СЕДИМЕНТОСФЕРЫ)***

***MICRO- AND NANOPARTICLES,
AND MASS AND ENERGY FLUXES
(ATMO-, CRYO-, HYDRO-, LITHO-,
SEDIMENTOSPHERES)***

**Агафонова Е.А., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н.,
Кудрявцева Е.А., Кравчишина М.Д.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:
agafonova.ea@ocean.ru;)

**Анализ распределения инвазивных видов диатомовых
водорослей в осадочном веществе Лофотенской котловины
Agafonova E.A., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N.,
Kudryavtseva E.A., Kravchishina M.D.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Analysis of invasive diatoms' distribution in sinking material of
the Lofoten basin**

Ключевые слова: седиментационные ловушки, диатомеи, потоки частиц, Северная Атлантика

Многомерный анализ позволил установить надежную взаимосвязь между внутригодовой изменчивостью вертикальных потоков инвазивных видов диатомовых водорослей и содержанием N, P, C_{орг} и отношением Si/Al в осадочном веществе Лофотенской котловины Норвежского моря. Появление северотихоокеанского планктонного вида *Neodenticula seminae* в осадочном веществе Лофотенской котловины обусловлено переносом водных масс в северо-восточном направлении из более южных частей Северной Атлантики. Изменение числа ледово-морских и ледово-неритических видов в Лофотенской котловине связано с сезонной изменчивостью ледяного покрова в Северном Ледовитом океане и выносом льда через пролив Фрама в субполярную Северную Атлантику.

В последнее время все чаще отмечается наличие инвазивных видов диатомовых водорослей в донных отложениях Северной Атлантики [1, 2], появление которых затрудняет интерпретацию палеоокеанологических данных. Поскольку из рассеянного осадочного вещества образуются донные осадки, его исследование позволяет установить особенности осадочного процесса при формировании состава ассоциаций диатомовых водорослей. Район исследования – Лофотенская котловина Норвежского моря находится в зоне формирования глобальной термохалинной циркуляции, где образование осадочного вещества и танатоценозов происходит под воздействием холодных полярных вод, проникающих из Северного Ледовитого океана, и теплых, более соленых вод Норвежского течения, направленного из Атлантического океана в Арктику [3].

В данной работе представлено первое специальное исследование инвазивных видов диатомовых водорослей в осадочном веществе Лофотенской котловины (71°33.773' с.ш. и 06°04.864' в.д., глубина 3000 м), накапливавшемся в течение нескольких месяцев автоматической глубоководной седиментационной обсерваторией (АГОС [4]) на горизонтах

550 и 2950 м. Под инвазивными приняты неместные чужеродные виды, распространяющиеся вне пределов нативного ареала, развитие которых связано с обстановками, не наблюдаемыми в районе исследования. В Норвежском море к ним относится североатлантический *Neodenticula seminae* [1], а, поскольку район исследования морским льдом не перекрывается, в данной работе к ним отнесены ледово-морские и ледово-неритические виды. Также рассмотрено изменение потоков североатлантического вида *Shionodiscus oestrupii*, распространенного преимущественно на широтах 40–60° с.ш., т.е. южнее места пробоотбора. Для определения диагностирующих параметров среды обитания применялся многомерный анализ. В него были включены значения основных абиотических химических факторов (содержания $C_{орг}$, N, P, $SiO_{2био}$ и отношения Si/Al и C/N).

Содержание общего ($C_{общ}$) и карбонатного ($C_{карб}$) углерода в осадочном веществе определялось на анализаторе TOC-L Shimadzu с приставкой SSM-5000A. Значения органического углерода ($C_{орг}$) рассчитаны по разнице содержания в пробе $C_{вал}$ и $C_{карб}$. Определения содержания общего азота ($N_{общ}$), $C_{общ}$ и их отношения (C/N) осуществлялись с помощью анализатора элементного состава CHNS EuroEa 3000 EuroVector по методике [5].

Измерения Si, Al и P проводились фотометрическим методом по методике ГЕОХИ РАН [6] с дополнениями А.Б. Исаевой (ИО РАН) для работы с малыми навесками вещества (точность 2–5%). Значения потоков вещества, содержаний Si и Al, $SiO_{2био}$, и отношения Si/Al в осадочном веществе заимствованы из работы [7].

Подготовка проб для диатомового анализа осуществлялась по стандартной методике [8]. Суммарные концентрации диатомовых водорослей на грамм сухого осадка (ств./г) рассчитывались согласно работе [9]. На основе данных о потоке осадочного вещества [7] и концентраций диатомовых водорослей рассчитывался поток диатомовых водорослей (ств./м²/сут).

В составе ассоциаций диатомовых водорослей осадочного вещества Ловфотенской котловины, собранного на глубинах 550 и 2950 м, было обнаружено 49 видов, из них 35 неритических и 14 сублиторальных. Среди них выделено 11 инвазивных видов: 4 – ледово-морских, 5 – ледово-неритических, североатлантический *N. seminae* и относительно тепловодный североатлантический *S. oestrupii*.

RDA (анализ избыточности) с участием всех ранее упомянутых экологических параметров показал, что они объясняют 71.31% ($\lambda_1 = 0.4808$ и $\lambda_2 = 0.2323$) вариаций потока инвазивных видов диатомовых водорослей в осадочном веществе горизонта 550 м и 59.88% ($\lambda_1 = 0.3805$ и $\lambda_2 = 0.2183$) – горизонта 2950 м (рисунок). Определено, что содержания P и $C_{орг}$ в случае осадочного вещества горизонта 550 м и содержания N, $C_{орг}$ и отношение Si/Al – горизонта 2950 м составляют минимальный набор экологических

параметров, наиболее достоверно объясняющих изменчивость потока инвазивных видов диатомовых водорослей ($p \leq 0.05$). Для осадочного вещества горизонта 550 м RDA показал, что ось 1 отрицательно коррелирует ($r = -0.8178$ и -0.7663) с наиболее значимыми параметрами – содержаниями P и $C_{орг}$, а ось 2 показывает положительную корреляцию с этими же параметрами ($r = 0.5407$ и 0.6167). Для осадочного вещества горизонта 2950 м ось 1 показала положительную корреляцию ($r = 0.862$, 0.8325 и 0.7659) со всеми учтенными переменными окружающей среды, а с осью 2 негативно коррелировало отношение Si/Al ($r = -0.2283$). Наиболее значимым параметром, оказывающим влияние на изменение потоков инвазивных видов диатомовых водорослей в осадочном веществе горизонта 550 м было содержание P (39.4% вариаций), горизонта 2950 м – отношение Si/Al (27.9% вариаций).

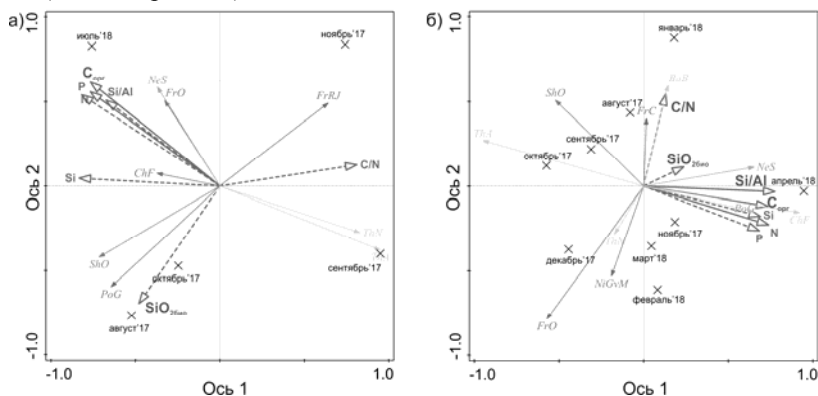


Рисунок. RDA диаграммы, иллюстрирующие взаимосвязь между наиболее значимыми экологическими факторами и потоками инвазивных видов диатомовых водорослей на горизонте 550 м (а) и 2950 м (б).

В осадочном веществе, собранном за период наблюдения на обоих горизонтах, увеличение потока вида *N. seminae* происходило одновременно с увеличением потока вида *S. oestrupii* и синфазно росту содержаний $C_{орг}$, N, P и отношения Si/Al. *N. seminae* положительно ординирован с осью 2 (79.9%, горизонт 550 м, рис. а), имеющей высокий коэффициент корреляции со значениями содержаний $C_{орг}$ и P, и с осью 1 (63%, горизонт 2950 м, рис. б), показавшей положительную корреляцию с содержанием N, $C_{орг}$ и отношением Si/Al. Поскольку ранее было установлено [10], что содержание во взвеси $C_{орг}$, N и P в водах североатлантического происхождения выше по сравнению с арктическими, это дает основание полагать, что в Лофотенскую котловину североатлантический вид *N. seminae* поступает под воздействием переноса водных масс в северо-восточном направлении из более южных частей Северной Атлантики, куда этот вид, вероятно, проникает вместе с промежуточными водами [11] из моря Лабрадор, где *N.*

seminae обнаружен в составе фитопланктона в результате миграции через Канадский Арктический архипелаг в периоды наименьшей ледовитости [2].

Ледово-морские и ледово-неритические виды *N. gelida* var. *manitounukensis*, *P. glacialis*, *Th. antarctica*, *Th. nordenskiöldii* ординированы отрицательно с осью 2 (в среднем 84.74%, горизонт 550 м, Рис.а) и с осью 1 (в среднем 56.84%, горизонт 2950 м, Рис.б). Виды *F. oceanica* (70%), *F. reginae-jahnnae* (50.8%) и *C. furcellatus* (25.21%) в осадочном веществе горизонта 550 м и *F. cylindrus* (25.5%), *C. furcellatus* (84,9%) и *B. bathyomphala* (44.7%) – горизонта 2950 м ординированы с положительной стороны с осями 2 (горизонт 550 м) и 1 (горизонт 2950 м). Увеличение потоков ледово-неритических видов происходит на фоне увеличения отношения C/N, фиксирующего поступление водных масс из Арктики [12]. Потоки ледово-морских и ледово-неритических видов увеличиваются вместе с Si/Al и SiO₂био, что свидетельствует о поступлении богатых биогенным кремнеземом холодных арктических вод [13]. Отсутствие ледово-морских видов в осадочном веществе, накапливавшемся в январе 2018 г. на горизонте 2950 м вероятно обусловлено максимальной площадью ледяного покрова в декабре–январе [14] и, как следствие, снижением интенсивности или полным прекращением выноса льда через пролив Фрама в субполярную Северную Атлантику.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» и всем участникам экспедиций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-00025, <https://rscf.ru/project/24-77-00025/>, при дополнительной поддержке в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020, экспедиционные исследования и отбор проб).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matul A., Kazarina G. The North Pacific Diatom Species *Neodenticula seminae* in the Modern and Holocene Sediments of the North Atlantic and Arctic // *Geosciences*. 2020. V. 10. № 5. P. 173.
2. Reid P., Johns D., Edwards M. et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: Arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800 000 years // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 1910–1921.
3. Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s // *ICES Journal of Marine Science*. 2004. V. 61. P. 846–863.

4. Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н. и др. Глубоководные обсерватории на транскаспийском разрезе – непрерывные исследования потоков рассеянного осадочного вещества // ДАН. 2014. Т. 456. № 4. С. 485–489.
5. Hedges J.I., Stern J.H. Carbon and nitrogen determinations of carbonate containing solids // *Limnology and Oceanography*. 1984. V. 29. № 3. P. 657–663.
6. Гельман Е.М., Старобина И.З. Фотометрические методы определения породообразующих элементов в рудах, горных породах и минералах. ГЕОХИ АН СССР, Центральная лаборатория, Сектор химических методов анализа. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1976. 69 с.
7. Дриц А.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д. и др. Потоки осадочного вещества в Лофотенской котловине Норвежского моря: сезонная динамика и роль зоопланктона // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 4. С. 576–594.
8. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. I. Л.: Наука, 1974. 403 с.
9. Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms // *Limnology and Oceanology*. 1973. V. 18. № 4. P. 647–653.
10. Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. Органическое вещество в водах высоких широт Баренцева и Норвежского морей // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001. С. 205–220.
11. Buckley M.W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic meridional overturning circulation: a review // *Rev. Geophys.* 2016. V. 54. P. 5–63.
12. Xiao S., Zhang L., Teng Y. et al. The Particulate Organic Carbon-to-Nitrogen Ratio Varies With Ocean Currents // *Front. Environ. Sci.* 2021. V. 9. P. 757471.
13. Torres-Valdes S, Tsubouchi T., Bacon S. et al. Export of nutrients from the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res-Oceans*. 2013. V. 118. P. 1625–1644.
14. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М. и др. Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // *Известия РАН. Физика атмосферы и океан*. 2009. Т. 45. № 6. С. 675–686.

Multivariate analysis has shown a reliable relationship between the invasive diatom fluxes variability and the contents of N, P, TOC and the Si/Al ratio in sinking material from the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. The appearance of *N. seminae* in the Lofoten Basin sinking material is related to the global transport of warm North Atlantic water masses from the Labrador Sea. Sea-ice and ice-neritic diatoms' number changed with the course of seasonal variability of the sea ice cover in the Arctic Ocean and the removal of sea ice through the Fram Strait into the North Atlantic.

Баренбаум А.А., Шиловский А.П.

(Институт проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН, Москва, azary@mail.ru, shilovsky@ipng.ru)

О взаимодействии макро- и микропроцессов в геологии

Barenbaum A.A., Shilovsky A.P.

(Oil and Gas Research Institute (OGRI) RAS, Moscow)

On the interaction of macro- and microprocesses in geology

Ключевые слова: квантовые явления в геологии, геосинтез углеводородов, образование метана и его взрывы в угольных шахтах, эксперименты Шноля, обнаружение гравитонов.

Приведены примеры, доказывающие необходимость проявления квантовых явлений на макроскопическом уровне в геологических процессах. Эти примеры демонстрируют неразрывную связь и взаимовлияние физических процессов на макро- и микроуровнях.

Введение

Считается, что квантовые явления на уровне атомов и элементарных частиц непосредственно не проявляются в геологических процессах на макроскопическом уровне (Wikipedia).

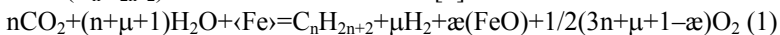
Мы придерживаемся другого мнения. Приводим три примера квантовых явлений в современных геологических процессах: 1) механизм геосинтеза углеводородов (УВ); 2) систематические взрывы метана в угольных шахтах и 3) макроскопические флуктуации природных процессов, обнаруженные С.Э. Шнолем.

1. Механизм геосинтеза

Геосинтезом мы называем [1] квантовый механохимический механизм образования УВ, играющий ключевую роль в современном пополнении месторождений нефти и газа [2]. В основе механизма геосинтеза лежит Научное открытие № 362 [3]. Оно заключается в том, что под воздействием сейсмотектонических процессов, даже при таком слабом, каким является приливное притяжение Солнца и Луны, в минералах пород возникают внутрикристаллические дефекты (разорванные химические связи). Дефекты диффундируют к границе кристаллов, где формируют слой радикалов, который снижает энергию Гиббса химических реакций на величину $\approx 40\text{--}80$ кДж/моль и более [4–6].

В результате реакции, термодинамически возможные лишь при высокой температуре и давлении, на поверхности активированных пород происходят в стандартных условиях ($T = 25^\circ\text{C}$ и $P = 1$ атм).

Примером таких реакций служит реакция геосинтеза « $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ». Для n -алканов ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) ее можно записать как [2]:



где: n , μ , α – стехиометрические коэффициенты, а значком «Fe» обозначены меанохимические свойства среды.

Реакция (1) является основной при современном образовании УВ нефти и газа в 40-летнем климатическом цикле круговорота углерода и воды через земную поверхность. В результате этой реакции синтезируется широкий спектр УВ, составляющих основную массу газа и нефти. Донором углерода при геосинтезе УВ в них служит любое вещество, содержащее окисленный углерод (органика (COH), CO₂ и карбонаты), а донором водорода является H₂O.

Другим примером геосинтеза является реакция «C+H₂O» [7]:



В «стандартных» условиях эта реакция термодинамически запрещена. Однако на активированной поверхности сколов угля при его шахтной добыче она не только интенсивно происходит, но и может носить характер взрыва.

2. Образование метана и его взрывы в шахтах

Хотя взрывы метана в угольных шахтах изучают и пытаются устранить более 150 лет, источник метана в углях и механизм его взрыва остаются пока не понятными [8]. Отметим две трудности их объяснения.

Первая трудность состоит в том, что в момент взрыва атмосфера шахт содержит газы разного генезиса: «угольный» и «глубинный», которые отличаются составом и взрывными свойствами. «Угольный» газ почти полностью состоит из метана, тогда как «глубинный» газ наряду с CH₄ содержит его гомологи (C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ и C₅H₁₂), жидкие УВ, а также H₂, CO₂, N₂, H₂S и редкие газы (He, Ra и др.).

Происхождение «угольного» и «глубинного» газов, как и причина их взрывов, не получили пока общепринятого объяснения [9]. Авторы этой работы наиболее вероятной причиной взрыва метана в шахтах считают внезапное поступление в шахту «глубинного» газа, который смешивается с «угольным» газом, что и приводит к детонации возникшей газовой смеси.

Вторую трудность мы связываем с тем, что в Кузнецком угольном бассейне, как и в других угольных бассейнах, наблюдается определенная ритмика взрывов в шахтах, причем сразу в нескольких шахтах, которая совпадает с периодом солнечной активности. Факты свидетельствуют, что на взрывы также влияет Луна. Более частые взрывы происходят в новолуния и полнолуния, когда Земля находится на одной линии между Солнцем и Луной [9].

Очевидно, что этот «космический» фактор также требует объяснения и учета, поскольку влияет на безопасность работы в шахтах.

Что касается первой трудности, то нами [7] на основании биосферной концепции [2] показано, что «глубинный» и «угольный» газ являются продуктами геосинтеза УВ при геохимическом круговороте углерода и воды через земную поверхность. При этом «глубинный» метан – результат

образования УВ из CO_2 и H_2O в реакции геосинтеза (1), а «угольный» метан – в реакции (2).

В работе [7] нами обращено внимание на то, что в результате природных сейсмических процессов и в процессе шахтной добыче угля в его массиве появляются заполненные водой микротрещины и каналы, а в периоды работы шахтеров еще в больших количествах образуются частицы угольной пыли. При этом на поверхности свежих сколов тех и других обязательно возникает слой радикалов, способный при определенных обстоятельствах придать реакции (2) взрывной характер.

Обратимся теперь к объяснению «космического» фактора.

3. Феномен макроскопических флуктуаций

Влияние космоса на квантовые явления было открыто С.Э. Шнолем [10, 11], первым установившим их связь с вращением Земли. Изучая эти явления в биологии, химии, при радиоактивном распаде химических элементов, в электромагнитном и нейтронном поле Земли, а также в разных электронных устройствах, он обратил внимание, что все они подвержены неслучайным изменениям, которые он назвал макроскопическими флуктуациями (МФ). При этом было установлено, что спектры МФ разных квантовых явлений одинаково меняются с периодами суточного вращения Земли, мод основных колебаний Луны при месячном вращении вокруг Земли, а также годового обращения Земли вокруг Солнца.

Анализируя результаты экспериментов С.Э. Шноля [10, 11], а также Н.А. Козырева [12], в работе [13] был получен вывод, что эти эксперименты обнаруживают мгновенное действие закона тяготения Ньютона на процессы квантовой природы в объектах микромира. При этом носителями энергии гравитационного взаимодействия, которая передается квантовым объектам, являются гравитоны, представляющие собой виртуальные векторные бозоны. Величина энергии гравитонов составляет $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ эВ, поэтому на квантовом уровне они могут взаимодействовать исключительно с объектами микромира [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку силы тяготения Солнца, Луны и других объектов космоса очень малы и при вращении Земли изменяются крайне слабо, а их влияние на процессы в микромире является квантовым и его реализуют гравитоны, то на основании нами приведенных геологических примеров можем заключить, что квантовые явления на нашей планете обязательно проявляются во всех макроскопических процессах, включая и процессы геологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиров С.Н., Закиров Э.С., Баренбаум А.А., Климов Д.С., Лысенко А.Д., Серебряков В.А. Геосинтез в проблеме происхождения нефти и газа // Тр. VIII Межд. технол. симп. М.: Институт нефтегаз. бизнеса. 2013. С. 43–46.

2. Баренбаум А.А. Биосферная концепция и современное нефтегазообразование // Смирновский сборник – 2024. М.: МАКС ПРЕСС, 2024. С. 160–180.
3. Научное открытие № 362: Явление преобразования органического вещества осадочных пород под действием тектонических и сейсмических процессов земной коры. Авторы: Трофимук, А.А., Черский Н.В., Царев В.П., Сороко Т.И. Приоритет 21.04.1982.
4. Молчанов В.И. Генерация водорода в литогенезе. Новосибирск: Наука, 1981. 142 с.
5. Черский Н.В., Царев В.П., Сороко Т.И., Кузнецов О.Л. Влияние тектоно-сейсмических процессов на образование и накопление углеводородов. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
6. Царев В.П. Особенности нефтегазообразования в зонах тектоно-сейсмической активации. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1988. 186 с.
7. Баренбаум А.А., Шиловский А.П. Метан в угольных шахтах: образование и причина его взрывов // Физические и петрофизические исследования в науках о Земле. 25 междунар. конф. посвященная 300-летию РАН. Москва, 30 сентября – 2 октября 2024. М.: ИГЕМ РАН, 2024. С. 14–17.
8. Грицко Г.И. Внезапные выбросы в шахтах // Наука Сибири. 2012. № 32-33. 2867–2868. 23.08.2012.
9. Ашушков В., Евдокимов И. Первопричина взрывов // Уголь Кузбасса, 2022.05. <http://www.uk42.ru/index.php?id=16312>
10. Шноль С.Э. Космохимические факторы в случайных процессах. Svenska fysikarkivet. 2009.
11. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Российский ученый Симон Шноль и его герои. Сыктывкар: Коми респуб. типография, 2023. 524 с.
12. Козырев Н.А. Избранные труды. Л.: Ленинградский университет, 1991. С. 363–383.
13. Баренбаум А.А. О механизме гравитационного притяжения ньютона и физической природе гравитации // Основания фундаментальной физики и математики. Матер. VIII Российской конференции (ОФФМ-2024). М.: РУДН, 2024. С. 154–159.
14. Barenbaum A.A. Influence of Sun, Moon and planets on Earth's gravitational field: Discovery of gravitons and estimation their energy // The Fifteenth Moscow Solar System Symposium. IKI RAS, 2024. 15MS3-MN-PS-15. P. 224–226.
15. Barenbaum A.A. Experiments of S. Shnol, the Physical Nature of Gravitation, Hubble's Law and Cosmic Microwave Background Radiation // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment. 2025. P. 440–459.

Examples are given proving that quantum phenomena necessarily manifest themselves at the macroscopic level in geological processes. These examples demonstrate the inseparable connection and mutual influence of physical processes at the macro- and micro-levels.

Василевич М.И., Василевич Р.С., Семенова Н.А.

(Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, e-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru)

Особенности химического состава атмосферных осадков и воздушных переносов на территории заповедника «Ненецкий»

Vasilevich M.I., Vasilevich R.S., Semyonova N.A.

(Institute of Biology, Federal Research Center Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar)

Features of the chemical composition of precipitation and air transfers in the “Nenetsky” reserve

Ключевые слова: снег, атмосферный перенос, лишеноиндикация, бриоиндикация, Баренцево море, ООПТ

Химический состав снега в заповеднике «Ненецкий» (Печорская губа Баренцева моря) отличается высокой вариабельностью, изучалось распределение взвешенного вещества, макрокомпонентов и металлов в конце зимы (март 2025 г.). Комплексный анализ содержания металлов в снеге, талломах эпигейных лишайников, мхов и органогенных горизонтов почв, для которых важную роль имеет атмосферное поступление веществ, позволили оценить роль дальнего переноса веществ и локальные геохимические условия.

Атмосфера территории Арктики выступает каналом для разгрузки воздушных потоков, которые переносят вещества из средних широт [1]. Особенностью химического состава атмосферы Арктики также является низкое влияние терригенного аэрозоля в условиях длительного зимнего периода, что определяет значимое влияние антропогенного поступления [2].

Показателями степени такого воздействия являются величины накопления вещества из атмосферы на подстилающую поверхность, дающие представление о пространственно-временной изменчивости количественного и вещественного состава частиц, осаждающихся при различных синоптических ситуациях. Исследование снежного покрова в комплексе с биоиндикацией с использованием лишайников и мхов дает более информативные данные о поступлении веществ из атмосферы.

Ненецкий заповедник образован для охраны и изучения типичных малонарушенных экосистем восточноевропейских тундр и прибрежных акваторий, расположен достаточно удаленно на юго-восточном побережье Баренцева моря в дельте р. Печора на пути западного трансграничного атмосферного переноса веществ от промышленно развитых северо-европейских стран, а также Мурманской и Архангельской областей [3].

В работе мы оперировали содержанием веществ в растворенной фазе талой воды. Средняя величина рН талой фазы снежного покрова

рассматриваемой территории НАО изменялась в диапазоне 4.81–5.43 ед. pH, что несколько ниже равновесного значения 5.65, однако весьма характерно для зимних атмосферных осадков данной территории [4].

Важно отметить низкую долю взвешенных веществ в составе талых вод с территории заповедника $1\text{--}2\text{ мг/дм}^3$, что соответствует фоновому уровню для Арктической зоны (2.19 мг/дм^3) [5].

Снежный покров территории заповедника характеризуется низкими значениями УЭП – 20 мкСм/см в среднем, не считая двух пунктов мониторинга вблизи Кузнецкой и Ходоварихи, где в силу особенностей рельефа происходит подтопление морскими водами, что сильно минерализует пробы снега, что встречается на подобных территориях.

Значения содержания макрокомпонентов в снеге территории исследования колебались в диапазон $0.35\text{--}26.4\text{ г/м}^2$. Наибольший вклад в минерализацию талой воды вносят хлорид-ионы, средняя концентрация которых составила 6.3 мг/дм^3 .

В порядке возрастания абсолютные концентрации ионов в составе снежного покрова можно расположить следующим образом: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$; $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$. В целом в составе снежного покрова преобладают хлориды и ионы натрия, что характерно для приморских территорий [4]. Наравне с увеличением влияния морского аэрозоля происходит обогащение снежного покрова сульфат-ионами ($r(\text{Cl}^-/\text{SO}_4) = 0.96$), что также происходит вследствие обогащения снега сульфатом магния ($r(\text{Mg}/\text{SO}_4) = 0.96$). С севера на юг заповедника отмечалось небольшое увеличение нитрат-ионов в снеге.

Вблизи г. Нарьян-Мара химический состав снежного покрова меняется, снижается влияние морских аэрозолей, что приводит к снижению содержания хлорид-ионов в 6 раз, ионов натрия в 5.3 раза, и, в целом, снижается общая минерализация проб в 10 раз.

Рассчитанные величины отношений ионов талых вод исследованной территории указывают на определяющую роль основных анионов и низкую степень их нейтрализации, что показано в таблице. Повсеместно на территории исследования в НАО ионы натрия и магния преобладали над содержанием ионов калия и кальция, что обусловлено влиянием морского аэрозоля. Данное предположение подтверждается близкими значениями соотношения $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ относительно значения для морской соли, равного 0.86.

Суммарное содержание тяжелых металлов находилось в диапазоне $0.6\text{--}7.6\text{ мг/м}^2$ и имело ту же тенденцию увеличения с юга на север заповедника. Отмечалось более высокое содержание в снеге в северной части заповедника для таких элементов как Zn, Pb, Cu, Cr и As.

Таблица. Соотношения ионов в талой воде заповедника «Ненецкий», моль-экв/дм³

Показатель	р. Кузнецкая	м.ст. Ходовариха	р. Белузей	р. Янготейх	р. М. Хабуйко	о. Ловецкий	мыс Костяной Нос	мыс Седуйский Нос	г. Нарьян-Мар
$([Mg^{2+}] + [Na^{+}]) / ([Ca^{2+}] + [K^{+}])$	14.4	14.5	9.7	11.1	8.6	4.6	5.6	8.9	1.7
$[Na^{+}] / [Cl^{-}]$	0.70	0.64	0.57	0.58	0.54	0.62	0.63	0.62	0.71
$[SO_4^{2-}] / [Cl^{-}]$	0.11	0.07	0.16	0.09	0.19	0.18	0.24	0.51	0.59
$\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^{+}] + [K^{+}]}{[SO_4^{2-}] + [NO_3^{-}] + [Cl^{-}]}$	0.87	0.84	0.68	0.74	0.62	0.73	0.67	0.49	0.77

Были рассчитаны коэффициенты обогащения ($K_{об.}$), чтобы оценить соотношение техногенных и терригенных источников поступления тяжелых металлов, [6]. Такой анализ позволяет более четко определить то, какие источники обусловили накопление тех или иных металлов в объектах исследования. По значениям $K_{об.}$ рассматриваемые элементы могут быть разделены на терригенные ($K_{об.} < 10$) и антропогенные ($K_{об.} > 10$) [7]. На рисунке на экспоненциальном графике средних значений $K_{об.}$ наглядно показано, что к терригенным элементам с учетом погрешности, в основном, относятся – Co, V, Ba, Sr, Ni, Cr.

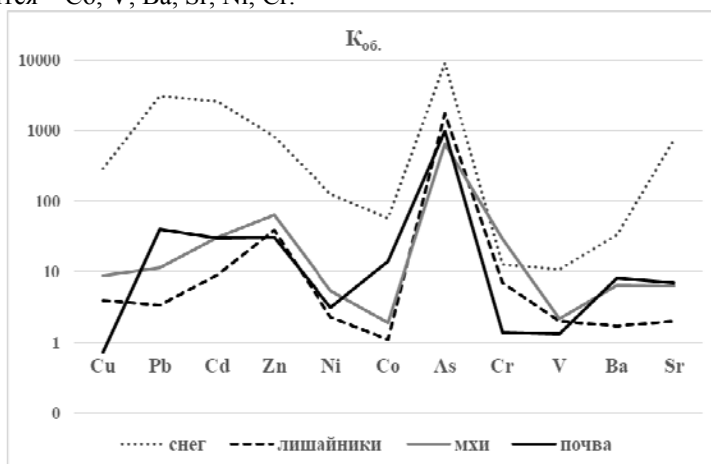


Рисунок. Среднеарифметические значения коэффициентов обогащения ($K_{об.}$) объектов исследования элементами

Однако насыщение этими элементами атмосферных осадков происходит в разы интенсивнее. Наиболее высокие значения $K_{об}$ рассчитаны для As и Pb. Однако, если обогащение Pb явно происходит в результате дальнего переноса от техногенных источников, то для As очевиден высокий геохимический фон территории. Сравнение значений $K_{об}$ показало не только избирательность в накоплении некоторых элементов лишайниками и мхами, но и позволило выделить элементы, поступление которых обусловлено дальним переносом веществ – Cd, Cu, Sr.

Поэтому в данном исследовании также важно было определить, из каких регионов происходит перенос воздушных масс, влияющих на специфику поступления веществ из атмосферы территорий. Расчет статистики траекторий обратного переноса воздушных масс с использованием архивных данных (<http://www.ready.noaa.gov>) показал, что преобладающее количество приходит с акватории Северного Ледовитого океана (45%). Также много формируется над территорией НАО, Республики Коми, Архангельской и Мурманской областей, Ямало-Ненецкого автономного округа. Вместе на долю этих территорий приходится 90 % всех круглогодичных переносов, что показала статистика за последние 5 лет (2020–2024 гг.).

Это достаточно интенсивные в плане антропогенной эмиссии регионы. Так, многолетний мониторинг показал, что наибольшее антропогенное воздействие наблюдается в Европейской части Арктики в Мурманской и Архангельской областях. На границе Республики Коми и НАО расположена целая сеть объектов инфраструктуры нефтегазодобывающей отрасли, что также может сказаться на увеличении примесных веществ в атмосфере заповедника [8].

Авторы благодарят сотрудников заповедника «Ненецкий» за помощь в проведении экспедиционных работ. Большую благодарность выражаем Гончаровой Надежде Николаевне за помощь в работе. Исследования выполнены за счет средств госбюджетной темы № 125021902460-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barrie L.A. Arctic air pollution: an overview of current knowledge // *Atmospheric Environment*. 1986. V. 20. № 4. P. 643–663.
2. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Тяжелые металлы в атмосфере над северным побережьем Евразии: межгодовые вариации зимой и летом // *Геофизические процессы и биосфера*. 2016. Т. 15. № 4. С. 5–17.
3. Топчая В.Ю., Виноградова А.А. Антропогенная нагрузка свинцом и кадмием на окружающую среду Калининградской области РФ – по данным ЕМЕР // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12–7. С. 1463–1467.
4. Котова Е.И., Василевич И.И., Ромашова К.В., Красавина А.С. Состав снежного покрова островов Баренцева и Карского морей // *Российская*

Арктика. 2021. № 4 (15). С. 17–27.

5. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. и др. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 106–118.

6. Справочник по геохимии / под ред. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. М.: Недра, 1990. 480 с.

7. Малахов С.Г., Маханько Э. П. Выброс токсичных металлов в атмосферу и их накопление в поверхностном слое земли // Успехи химии. 1990. Т. 59. Вып. 11. С. 1777–1798.

8. Voronkova O.V. Monitoring of the Arctic Zone Pollution in the Russian Federation // Components of scientific and technological progress. 2021. № 2 (56). P. 24–27.

The chemical composition of snow in the Nenetsky reserve (Pechora Bay of the Barents Sea) is highly variable. The distribution of suspended matter, macrocomponents and metals at the end of winter was studied (March 2025). The complex analysis of metal content in snow, epigeic lichens, mosses and organogenic soil horizons, for which atmospheric input of substances plays an important role, made it possible to assess the role of long-range transport of substances and local geochemical conditions.

Виноградова А.А.¹, Котова Е.И.², Лохов А.С.²

(¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, e-mail: anvinograd@yandex.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва)

Высота слоя перемешивания в нижней тропосфере над морями Российской Арктики

Vinogradova A.A.¹, Kotova E.I.², Lokhov A.S.²

(Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow; ¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

The mixing layer height in the lower troposphere above the Russian Arctic Seas

Ключевые слова: тропосфера, высота слоя перемешивания, моря Российской Арктики, модель HYSPLIT

Сравниваются средние за 2001–2021 гг. значения высоты слоя перемешивания (ВСП) в нижней тропосфере над морями Российской Арктики и окружающими территориями суши в разные сезоны в дневные и ночные часы. Над северными (замерзающими) морями сезонный ход величины ВСП имеет минимум в теплое время года – в противоположность территориям суши, где летом ВСП максимальна.

Условия существования наземных экосистем в удаленных районах, в том числе в Арктике, в значительной степени определяются дальним атмосферным переносом загрязнений из более южных широт. Высота слоя перемешивания (ВСП) – это показатель устойчивости нижнего слоя атмосферы, от которого зависит расстояние, на которое распространяются примеси, и способность их накопления в воздухе вблизи поверхности в конкретных физико-географических условиях различных регионов [1–3].

ВСП в приземном слое атмосферы определяется процессами динамического и конвективного перемешивания. Первое связано со свойствами (орографией и шероховатостью) подстилающей поверхности, которые сильно меняются как в пространстве (разные климатические зоны), так и от сезона к сезону. Второе зависит от вертикального и горизонтального градиентов температуры и скорости ветра в нижнем слое атмосферы (в частности, от мощности температурной инверсии, высоты нижнего слоя приподнятой инверсии, а также от скачков температуры и свойств разных участков поверхности, например, вода–суша, лед–вода и др.). ВСП меняется не только от сезона к сезону, но и в течение суток, поскольку стратификация приземной атмосферы и свойства поверхности сильно зависят от инсоляции.

Существует также понятие глубины слоя перемешивания (mixing depth) в верхнем слое водных объектов, примыкающем к атмосфере. Свойства этого слоя для разных океанов, морей, рек и озер изучены более подробно и надежно, чем свойства атмосферного слоя перемешивания [4]. Возможно,

это связано с большей вязкостью (при температуре 20°C коэффициенты вязкости воздуха и воды отличаются более чем в 50 раз), большей инерционностью и, тем самым, меньшей временной изменчивостью водной среды по сравнению с воздухом.

При современной доступности данных дистанционного зондирования сведения о вертикальной стратификации тропосферы можно получать из открытых интернет-ресурсов (например, [5, 6]). При этом значения ВСП рассчитываются по вертикальным профилям метеорологических показателей атмосферы для конкретного часа и конкретной географической точки, причем исходная метеорология также является результатом реанализа измерений и/или модельных вычислений.

Массив значений ВСП для анализа данной работы был получен при расчетах дальнего атмосферного переноса воздушных масс в арктические районы России (табл. 1) в 2001–2021 гг. с применением модели HYSPLIT [6]. Обратные траектории длительностью 3–5 суток для каждого пункта рассчитывались ежесуточно (интервал счета по траектории 1 час) для центральных месяцев сезонов (январь, апрель, июль, октябрь). При этом для всех точек каждой траектории вычислялись не только географические координаты, но также значения высоты слоя перемешивания (Mixing Layer Depth, MLD).

Таблица 1. Координаты пунктов при расчетах ВСП

№ пункта	Название	Широта	Долгота
1	Кандалакша	67.1° с.ш.	32.3° в.д.
2	Пинежский заповедник	64.3° с.ш.	43.2° в.д.
4	Ненецкий заповедник	68.5° с.ш.	53.5° в.д.
5	Гыданский заповедник	72.5° с.ш.	76.7° в.д.
6	Усть-Ленский заповедник	72.4° с.ш.	126.5° в.д.
7	Остров Врангеля	71.1° с.ш.	178.5° з.д.

Далее, для каждого месяца в ячейке (1×1 градус) поля географических координат (от 50 до 80° с.ш.) усреднялись все значения ВСП для попавших туда за 21 год точек траекторий переноса воздушных масс к рассматриваемым пунктам. Анализ внутрисуточных вариаций ВСП проводился по дневным (с 11:00 до 18:00) и ночным (с 23:00 до 6:00 следующих суток) значениям ВСП для каждой ячейки с учетом временных поясов. Массивы дневных и ночных данных анализировались отдельно. Все значения стандартного квадратичного отклонения (СКО) от средних показателей, приведенные ниже, рассчитаны по территориям и отражают пространственные вариации ВСП. Межгодовые вариации ВСП не анализировались.

Над морями высота слоя перемешивания определяется разностью

температур морской воды, воздушной массы над ней и окружающей суши, а также волнением морской поверхности и скоростью ветра. Закономерности для разных сезонов – на рисунке и в табл. 2.

Таблица 2. Средняя за 2001–2021 гг. высота слоя перемешивания ВСП $\pm$ СКО над морями. Верхняя строка – день, нижняя – ночь

Моря СЛО	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
Баренцево	614 $\pm$ 323	559 $\pm$ 280	214 $\pm$ 79	657 $\pm$ 189
	636 $\pm$ 330	520 $\pm$ 295	213 $\pm$ 93	684 $\pm$ 176
Карское	168 $\pm$ 124	221 $\pm$ 109	156 $\pm$ 44	461 $\pm$ 151
	190 $\pm$ 144	156 $\pm$ 105	134 $\pm$ 40	499 $\pm$ 181
Лаптевых	75 $\pm$ 33	149 $\pm$ 43	190 $\pm$ 102	274 $\pm$ 108
	73 $\pm$ 33	95 $\pm$ 35	141 $\pm$ 45	323 $\pm$ 149
Восточно-Сибирское	67 $\pm$ 31	145 $\pm$ 57	189 $\pm$ 110	249 $\pm$ 137
	68 $\pm$ 39	88 $\pm$ 34	137 $\pm$ 44	250 $\pm$ 160
Чукотское	53 $\pm$ 22	136 $\pm$ 45	127 $\pm$ 42	353 $\pm$ 245
	57 $\pm$ 24	86 $\pm$ 33	116 $\pm$ 29	330 $\pm$ 204

На рисунке слева видно, что зимой величины ВСП максимальны над Баренцевым морем, поскольку оно замерзает не полностью. Также более позднее замерзание Карского и Чукотского морей проявляется в повышенном значении ВСП над ними осенью. В июле, когда для каждого моря в Арктике различия температур воды, воздуха над ней и окружающей суши незначительны, средняя многолетняя величина ВСП мала и практически одинакова (100–200 м). Как зимой, так и летом, в условиях полярной ночи или дня, соответственно, различия между значениями ВСП днем и ночью для каждого моря почти отсутствуют.

Для сравнения на рисунке справа приведены аналогичные сезонные распределения ВСП над прилегающими климатическими квази-однородными территориями суши [7], где они определяются, главным образом, качеством подстилающей поверхности и скоростью ветра в разные сезоны. Заметим, что прибрежные зоны характеризуются максимальными горизонтальными градиентами ВСП и различными видами неустойчивости в нижней тропосфере и на поверхности морей.

Для сезонных вариаций величины ВСП над сушей характерны максимальные значения в теплое время года, а минимальные в холодное. Над северными (замерзающими) морями, наоборот, сезонный ход величины ВСП имеет минимум в теплое время года. Некоторые отличия в этих закономерностях характерны для регионов Дальнего Востока, подверженных влиянию морей Тихого океана, и для Чукотского моря, минимальная ледовитость которого наблюдается осенью, как и во всей

тихоокеанской части СЛО.

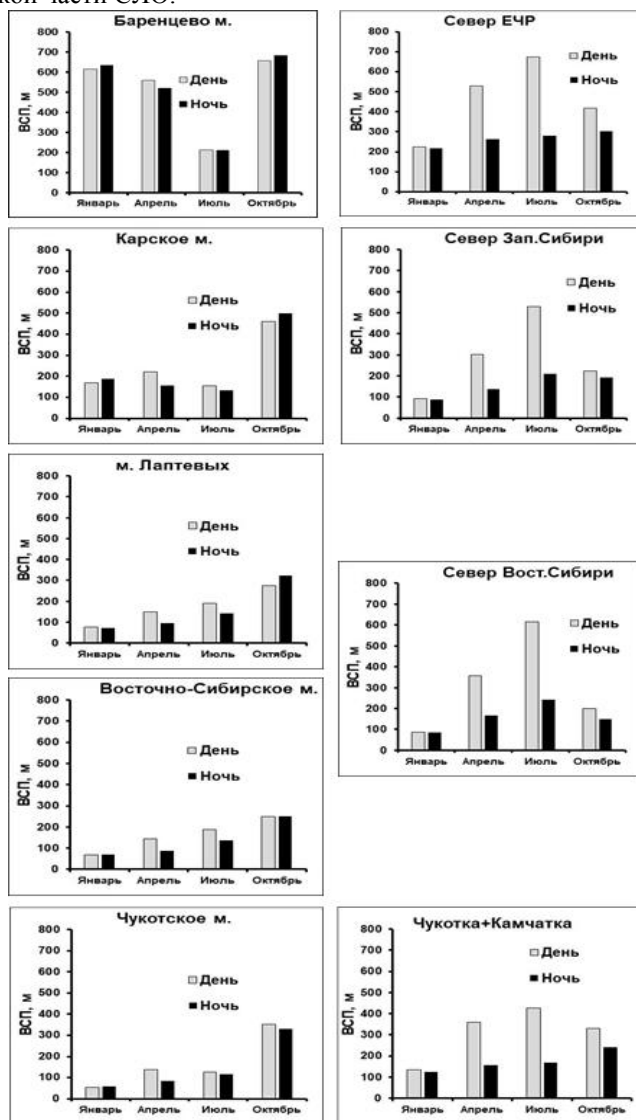


Рисунок. ВСП над морями Российской Арктики (слева) и над прилегающими климатическими квази-однородными территориями суши (справа) в разные сезоны днем и ночью.

Надежность приведенных средних оценок обеспечивается длительностью рядов и многократностью вычисления исходных данных для

каждой ячейки (за 21 год для 6 пунктов). Численные результаты работы не противоречат общим представлениям о механизмах формирования слоя перемешивания в приземной атмосфере и результатам отдельных измерений над различными территориями в разные сезоны (например, [8]).

Приведенные многолетние средние значения высоты слоя перемешивания над северными территориями России будут полезны при сравнительном анализе климатических и экологических показателей окружающей среды разных регионов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН №125020501413-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
2. Vinogradova A.A. Distant Evaluation of the Influence of Air Pollution on Remote Areas // *Izv., Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. № 7. P. 712–722. DOI: 10.1134/S0001433815070099
3. Ахметшина А.С. Инверсии температуры воздуха как фактор, влияющий на уровень загрязнения пограничного слоя атмосферы (на примере г. Томска): Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2015. 26 с.
4. Montégut C.D.B., Madec G., Fischer A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. C12003.
5. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). [Электронный ресурс]. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
6. NOAA Air Resources Laboratory [Электронный ресурс]. <https://www.arl.noaa.gov/>
7. Виноградова А.А., Котова Е.И., Лохов А.С. Высота слоя перемешивания в атмосфере над квазиоднородными климатическими территориями и арктическими морями России // *Оптика атмосферы и океана*. 2025. Т. 38. № 6. С. 415–421. DOI: 10.15372/AOO20250601
8. Одицов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Высота слоя перемешивания в условиях температурных инверсий: экспериментальные данные и модельные оценки // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 7. С. 549–558. DOI: 10.15372/AOO20220705

The average (through 2001–2021) values of the mixing layer height (MLH) in the lower troposphere over the Russian Arctic Seas and surrounding land areas are compared for different seasons during the daytime and at night. In the northern regions, the MLH values are minimal over the Seas in summer, in contrast to the land areas where MLH have maximum in warm season.

Вологина Е.Г.¹, Штурм М.², Буднев Н.М.³

(¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: vologina@crust.irk.ru;

²Швейцарский федеральный институт науки и технологии окружающей среды, г. Дюбендорф; ³Иркутский государственный университет, г. Иркутск)

Вертикальные потоки осадочных частиц в Южной котловине озера Байкал с 2020 по 2021 гг.

Vologina E.G.¹, Sturm M.², Budnev N.M.³

(¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk; ²Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf; ³Irkutsk State University, Irkutsk)

Vertical fluxes of sediment particles in the Southern Basin of Lake Baikal from 2020 to 2021

Ключевые слова: озеро Байкал, седиментационные ловушки, потоки осадочных частиц, терригенный и биогенный материал, диатомеи.

Вертикальные потоки осадочных частиц в Южном Байкале с 2020 по 2021 гг. изменялись от 183 до 213 г/м²/год. Максимальные значения потоков в мае, июне и июле 2020 г. связаны с массовым цветением диатомей рода *Synedra*. Полученные данные указывают на высокие темпы осаждения диатомовых водорослей в связи с агрегацией отдельных створок.

Целью работы является изучение современного осадконакопления в озере Байкал. Эти исследования выполняются с использованием седиментационных ловушек в Южной котловине озера в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа.

Цилиндрические ловушки EAWAG-130 и автоматизированные ловушки TECHNICAP[®]-PPS4/3 были размещены на притопленной буйковой станции в точке с координатами 51°46.076' с.ш., 104°24.948' в.д. Глубина озера в точке исследования – 1366 м. Подробное описание используемых ловушек приведено в [1, 2].

Было установлено десять цилиндрических ловушек на глубинах 100 м, 200 м, 300 м, 450 м, 550 м, 700 м, 900 м, 1100 м, 1313 м и 1363 м. Отбор проб осуществлялся в период с 6 марта 2020 г. по 17 марта 2021 г.

Две автоматизированные ловушки были размещены на глубинах 550 м (ловушка S-1) и 1363 м (ловушка S-2). Время отбора проб было запрограммировано по месяцам. Периоды и продолжительность отбора проб приведены в таблице 1.

Отобранный материал был высушен посредством вымораживания (freeze-dried) на приборе FD ALPHA и взвешен на аналитических весах. Рассчитаны общие потоки осадочного вещества в граммах на 1 м² в год (г/м²/год) для цилиндрических ловушек и в миллиграммах на 1 м² в сутки (мг/м²/сут) для автоматизированных ловушек.

Качественный состав частиц определялся в препаратах-мазках (smear-

slides) на бинокулярном микроскопе SK14 с увеличением 100× и 400×.

Таблица. Общие потоки осадочного вещества, отобранного автоматизированными ловушками на глубинах 550 и 1363 м с 7 марта 2020 г. по 1 марта 2021 г.

Период отбора проб	Номер пробы	Продолжительность отбора, количество дней	Общий поток, мг/м ² /сут	
			Ловушка S-1 (550 м)	Ловушка S-2 (1363 м)
7.03.20–01.04.20	1	25	20.6	121
01.04.20–01.05.20	2	30	81.4	216
01.05.20–01.06.20	3	31	930	1000
01.06.20–01.07.20	4	30	1442	1531
01.07.20–01.08.20	5	31	601	586
01.08.20–01.09.20	6	31	6.06	28.6
01.09.20–01.10.20	7	30	2.60	1.87
01.10.20–01.11.20	8	31	0.39	3.55
01.11.20–01.12.20	9	30	—*	1.53
01.12.20–01.01.21	10	31	241	2.45
01.01.21–01.02.21	11	31	15.0	2.97
01.02.21–01.03.21	12	28	1.86	4.21
Среднее			304	292
Минимальное			0.39	1.53
Максимальное			1442	1531

*В ловушке обнаружена полуразложившаяся рыба, поэтому данные не учитывались

Примечание: серым цветом выделены строки, соответствующие пиковым значениями общих потоков.

Просмотр препаратов-мазков (smear-slides) показал, что состав всех проб, отобранных с помощью цилиндрических ловушек, в целом аналогичен. Биогенная часть представлена главным образом створками диатомей видов рода *Synedra*. Отмечается незначительное содержание *Aulacoseira* и *Cyclotella*, единичные спикулы губок, остатки рачков-бокоплавов рода *Gammarus* и другие неопределенные частицы. Из аллохтонного биогенного материала наблюдаются редкие частицы пыльцы. Терригенная часть проб состоит из глинистого вещества, слюдисто-глинистых агрегатов и единичных минеральных зерен алевроитовой размерности. В одной из проб встречено полуугловатое зерно тонкозернистого песка. Однородный состав диатомей, отмеченный на разных глубинах водной толщи озера, объясняется агрегацией отдельных

клеток, что приводит к увеличению скорости их осаждения.

Общий поток (ОП) осадочного вещества изменяется от 183 до 213 г/м²/год (рис.). Повышенные значения ОП (213 г/м²/год) наблюдаются в самом верхнем слое водной толщи на глубине 100 м. На 200 м общий поток понижается до 195 г/м²/год, а на глубинах от 300 м до 1313 м изменяется от 183 до 191 г/м²/год. В непосредственной близости от дна озера на глубине 1363 м ОП возрастает до 201 г/м²/год, что связано с взмучиванием поверхностных илов на границе раздела осадок–вода.

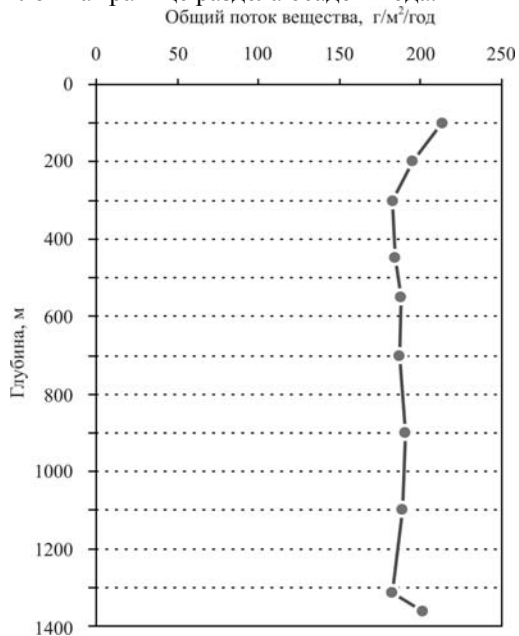


Рисунок. Общий поток осадочного вещества на разных глубинах Южной котловины Байкала в период с 6 марта 2020 г. по 17 март 2021 г.

В верхней автоматизированной ловушке S–1 (глубина 550 м) общий поток осадочного вещества изменяется от 0.39 до 1442 мг/м²/сут при среднем значении 304 мг/м²/сут (таблица). В нижней ловушке S–2 (глубина 1363 м) ОП варьирует от 1.53 до 1531 мг/м²/сут и в среднем составляет 292 мг/м²/сут. Пики потоков для ловушек S–1 и S–2 приходятся на период с 1 мая до 1 августа 2020 г. При этом максимальные значения ОП (1442 мг/м²/сут – на глубине 550 м и 1531 мг/м²/сут – на глубине 1363 м) наблюдаются с 1 июня до 1 июля 2020 г. (таблица). Просмотр препаратов-мазков (smear-slides) показал, что в составе отобранного материала в пробах, соответствующих пиковым значениям ОП, доминируют виды рода *Synedra*. Таким образом, в мае, июне и июле 2020 г. происходило массовое

цветение диатомей рода *Synedra*. При этом данные, полученные для двух автоматизированных ловушек, расположенных на глубинах 550 и 1363 м, хорошо коррелируют между собой (таблица), что указывает на высокие темпы осаждения диатомей. Подобная закономерность отмечалась и в другие годы при анализе данных, полученных с помощью автоматизированных ловушек, расположенных на разных глубинах Южного Байкала [1, 2]. Это связано с высокими скоростями опускания агрегированных клеток диатомовых водорослей (до 60 м в день) в период их цветения [3, 4].

Авторы благодарны участникам экспедиций в рамках Байкальского нейтринного проекта за неоценимую помощь в проведении работ. Мы глубоко признательны Е.Г. Поляковой (ИЗК СО РАН) за помощь в подготовке проб для анализов. Исследование выполнено благодаря многолетнему международному сотрудничеству при поддержке EAWAG (проект № 85145), в рамках государственного задания ИЗК СО РАН (проект № 1025022500090-2-1.5.1-1.5.1) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZE-2023-0004). В работе частично задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологина Е.Г., Штурм М. Потоки осадочного вещества в Южном Байкале. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 9. С. 1314–1323.
2. Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С. Потоки и состав осадочного вещества в водном столбе Южного Байкала (с марта 2015 г. по март 2016 г.) // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 4. С. 547–558.
3. Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J. et al. The deposition and accumulation of endemic planktonic diatoms in the sediments of Lake Baikal and an evaluation of their potential role in climate reconstruction during the Holocene // Terra Nostra. 2000. V. 9. P. 34–48.
4. Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M. et al. Quantitative and qualitative relationships between planktonic diatom communities and diatom assemblages in sedimenting material and surface sediments in Lake Baikal, Siberia // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. № 4. P. 1643–1661.

Vertical fluxes of sediment particles in the Southern Basin of Lake Baikal varied from 183 to 213 g/m²/year from 2020 to 2021. Maximum flux values in May, June and July 2020 are associated with mass blooms of diatoms of the genus *Synedra*. The obtained data indicate high rates of sedimentation of diatoms due to the aggregation of individual valves.

**Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Талпа Б.В., Попов Ю.В.,
Денисов В.И.**

(Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, e-mail: gardim@sfedu.ru)

**Вклад эоловой взвеси в удельный поток осаждающегося
взвешенного вещества на дно малых озер юга европейской
части России**

**Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V., Popov Yu.V.,
Denisov V.I.**

(Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don)

**Contribution of aeolian suspension to the specific flow of
sedimented suspended matter to the bottom of small lakes in the
south of the European part of Russia**

Ключевые слова: седиментомеры и эоломеры, седименты, эоловая взвесь, поток вещества

В настоящей работе представлены результаты натурных экспериментов по оценке объемов осаждения эолового и седиментационного материала соответственно на водную поверхность и дно озер юга европейской части России. Данные получены с помощью эоловых и седиментационных ловушек.

На 6 озерах (по два озера в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях) (рис. 1) в сентябре – октябре 2024 г. проведены работы по оценке объемов осаждения эолового и седиментационного материала на водную поверхность и дно озер, соответственно. Оценка выполнена с помощью двух эоловых и двух седиментационных ловушек (эоломеров и седиментомеров) (рис. 2) соответственно. Площадь поверхности осаждения эоломеров составляет 518 и 925 см², седиментомеров – 191 см². Эоломеры устанавливались у уреза воды на высоте 0.6–0.8 м над ее поверхностью. В эоломеры в начале экспозиции приливалось по 1.5 л дистиллированной воды. Спустя сутки вода из эоломера сливалась в емкость и фильтровалась через заранее взвешенные фильтры. Седиментомеры, характеристики которых приведены в работе [1], устанавливались в придонном слое. Предварительно в них заливалась вода из данного слоя. При расчете удельного потока седиментов на дно учитывалось содержание взвешенного вещества в воде.

Установка седиментомеров выполнена на удаленных от берегов участках с борта надувной моторно-гребной лодки. В точках наблюдения учитывались гидродинамические и гидрометеорологические характеристики (температура воздуха, скорость и направление ветра, волнение, глубина). В воде контролировались следующие показатели:

температура, прозрачность, минерализация, pH, содержание O_2 и взвешенных веществ. Количество взвешенных веществ определено гравиметрическим методом согласно РД 52.24.468-2019, прозрачность воды – по диску Секки. Концентрации O_2 в воде, ее температура и минерализация измерены непосредственно на водном объекте кислородометром Марк 303М и кондуктометром Марк 603/1, соответственно. Также сразу после отбора проб с помощью pH метра иономеров – “Экотест 2000 И” измерены pH. Промер глубин выполнен с помощью эхолота Практик 8 “Маяк”.

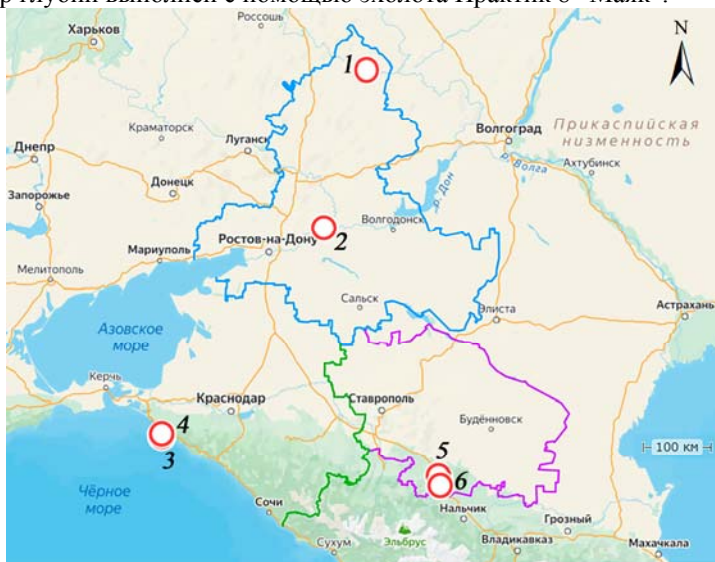


Рис. 1. Схема расположения озер. Ростовская область: 1 – оз. Старое, 2 – оз. Старый Дон; Краснодарский край: 3 – оз. Малый Лиман, 4 – оз. Абрау; Ставропольский край: 5 – оз. Каррас, 6 – оз. Большой Тамбукан.

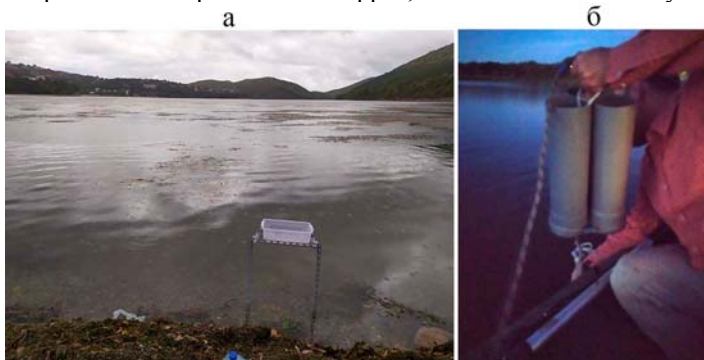


Рис. 2. На фото (а) – эхолот на оз. Абрау; на фото (б) – момент установки седиментомера на оз. Старый Дон.

Изученные озера относятся к водосборам бассейнов Азовского, Черного и Каспийского морей. Они расположены на высотах от 6 (озера Старый Дон и Малый Лиман) до 552 м (оз. Большой Тамбукан) над уровнем моря и по площади водного зеркала являются малыми озерами (менее 10 км²). Максимальные измеренные глубины в озерах варьировались от 2.6 м (оз. Малый Лиман) до 11 м (оз. Старое).

В соответствии с широко применяемой типизацией [2] изученные озера Ростовской области относятся к группе речных озер (старицам). Озера Малый Лиман (Лиманчик) и Абрау – к группе завальных озер, образовавшихся в результате землетрясения и перегораживания узкой долины реки оползнями и обвалами больших масс горной породы [3]. Озеро Большой Тамбукан, расположенное в синклинальной мульде, относится к группе тектонических озер платформенного типа, и оз. Каррас – к группе антропогенных озер (образовано в 1975 г. на месте балки р. Грязная). Исследованные озера Краснодарского и Ставропольского краев имеют форму, близкую к округлой или овальной; старичные озера Ростовской области – удлинненную форму.

В исследованных озерах Ростовской области и Краснодарского края воды пресные (минерализация от 0.2 до 0.7 г/л), в озерах Ставропольского края – солоноватые (1.3 и 24.2 г/л), с максимальной минерализацией характерной для оз. Большой Тамбукан.

Количество взвешенного вещества в воде озер варьировалось от 4.2 до 14.4 мг/л, с минимальными значениями (4.2–5.3 мг/л) в озерах Старое, Абрау и Каррас, исследованных в условиях близких к штилю, и характеризующихся также большой прозрачностью вод (140–153 см). В период исследования озер Малый Лиман и Большой Тамбукан наблюдался сильный ветер, что в условиях относительно небольших глубин, вероятно, послужило причиной взмучивания верхнего слоя отложений и, как следствие, увеличения количества взвешенного вещества в воде до 10.8 и 14.4 мг/л, соответственно. Дополнительным источником взвешенного вещества в воде могла быть также ведущаяся в оз. Большой Тамбукан в период исследования добыча лечебных грязей. Высокие содержания взвешенного вещества в воде озера Старый Дон (14.4 мг/л) и минимальная прозрачность его вод обусловлены, главным образом, визуально наблюдаемым развитием фитопланктона (цветение воды).

Величины рН озерных вод варьировались в нейтральном – слабощелочном диапазоне (7.36–8.53). Концентрации растворенного кислорода изменялись в пределах от 3.16 мг/л (34% насыщения) до 11.79 мг/л (125%), при этом как минимальные, так и максимальные значения зафиксированы соответственно в придонном и поверхностном слоях воды оз. Старый Дон на участке с глубинами 4 м.

Удельный поток седиментационного материала на дно исследованных озер варьировался от 5.2 до 63.6 г/(м² сутки) (таблица). Минимальный поток

седиментов был характерен для глубоководных участков озера Старое Ростовской области. Максимальный поток седиментов на дно выявлен в самом мелководном озере Малый Лиман Краснодарского края, что, вероятно, связано со взмучиванием верхнего слоя отложений под влиянием сильного ветра. Относительно большой поток взвеси на дно наблюдался в оз. Старый Дон Ростовской области и оз. Абрау Краснодарского края. Для большинства озер более высокие значения потока, как правило, фиксируются на участках, расположенных ближе к берегу.

Таблица. Удельные потоки эолового и седиментационного материала на водную поверхность и дно исследуемых озер, соответственно

Озеро (глубина установки седиментом еров, м)	Координаты озер, сш./в.д.	Удельный поток седиментов на дно, г/(м ² сут.)	Удельный поток эолового материала, г/м ² сут. / Доля от среднего потока седиментов, %	Примечание
Старое (6.0– 9.2)	49°37'33"/ 41°29'02"	<u>5.2–9.9</u> * 7.6	<u>0.297–0.305</u> 3.90–4.01	эоломеры под деревьями
Старый Дон (3.2–4.2)	47°31'53/ 40°48'56"	<u>27.0–50.5</u> 38.7	<u>0.046–0.109</u> 0.12–0.28	эоломеры вблизи тростниковых зарослей и на песчаном пляже
Малый Лиман (2.4– 2.5)	44°40'13"/ 37°35'27"	<u>61.5–63.6</u> 62.5	<u>0.080</u> 0.13	сильный ветер
Абрау (2.5– 4.2)	44°42'05"/ 37°35'33"	<u>26.9–53.6</u> 40.3	<u>0.023</u> 0.06	мелкий дождь более 50% экспозиции
Каррас (3.2– 4.5)	44°05'45/ 43°06'30"	<u>20.2–28.7</u> 24.5	<u>0.027</u> 0.11	штилевые условия
Большой Тамбукан (3.3–4.1)	43°57'41"/ 43°10'12"	<u>15.2–18.5</u> 16.9	<u>0.068</u> 0.40	сильный ветер
* – В числителе приведен предел изменения, в знаменателе – среднее значение.				

Удельные потоки эолового материала на поверхность исследованных озер варьировались в диапазоне 0.023–0.305 г/(м² сутки). Минимальные значения эолового потока выявлены в озерах Абрау и Каррас. Для первого озера это связано с дождливой погодой большую часть времени экспозиции эоломера, а для второго озера – со штилевыми условиями. Максимальные потоки эолового материала на водную поверхность зафиксированы в озерах Старое и Старый Дон, что в первом случае обусловлено установкой

эоломеров под деревьями, а во втором – связано с установкой одного из эоломеров вблизи зарослей тростника южного. Для данных озер доминирующая масса эолового материала представлена отмершими частями растений. В остальных озерах значительная часть составляет минеральная компонента. Последняя во всех озерах представлена кварцевыми зернами (в озере Старое ожеженными) с органическими агрегатами почв. В озерах Абрау, Каррас и Большой Тамбукан в эоловой взвеси присутствует техногенный материал (мелкие обломки бетона), источником которого, вероятно, являются бетонные плиты, положенные на отдельных участках озер вблизи уреза воды.

Для исследованных озер, за исключением озера Старое, доля эоловой взвеси, оседающей на их водную поверхность, составляет от 0.06 до 0.40% (в среднем 0.18%) от количества взвешенного вещества, осаждающегося на дно озер. В оз. Старое, по всему периметру которого вблизи уреза воды растут деревья, доля эоловой взвеси увеличивается до 3.9–4.01%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, в Южном федеральном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов В.И., Латун В.В. Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Черного моря (по данным седиментационных ловушек // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 77–85.
2. Hutchinson G.E. A Treatise on Limnology. I. Geography, Physics and Chemistry. 1957. 1015 p.
3. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Попов Ю.В., Доценко Н.В., Михайленко А.В. Метано- и сульфидогенез в озерах полуострова Абрау (Краснодарский край) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 117–131.

This paper presents the results of field experiments to estimate the deposition of Aeolian and sedimentation material, respectively, on the water surface and bottom of lakes in the southern European part of Russia. The data were obtained using Aeolian and sedimentation traps.

**Губанова Д.П.¹, Котова Е.И.², Стародымова Д.П.²,
Зметная М.И.³**

(¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, e-mail:

gubanova@ifaran.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва;

³Северный филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии», Архангельск)

**Влияние атмосферной пыли на экосистемы суши и океана:
экспериментальные данные о дальнем переносе аридного
аэрозоля в западный сектор Российской Арктики**

**Gubanova D.P.¹, Kotova E.I.², Starodymova D.P.²,
Zmetnaya M.I.³**

(¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, gubanova@ifaran.ru;

²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³North branch of the Federal State

Budget Scientific Institution “Russian Federal Research Institute of Fisheries and
oceanography”, Arkhangelsk)

**Influence of atmospheric dust on ecosystems of land and ocean:
experimental data on long-range transport of arid aerosol to the
Western sector of the Russian Arctic**

Ключевые слова: атмосферный перенос, пылевой аэрозоль, массовая концентрация,
проба снега, нерастворимое вещество, морфология, минеральный состав,
траекторный анализ, Архангельская область

Анализируются экспериментальные данные, подтверждающие редкое явление
дальнего переноса аридного аэрозоля в западный сектор российской Арктики.
Обсуждаются характеристики пылевых частиц в атмосфере, морфология и
минеральный состав проб снега в Архангельской области, а также влияние этого
явления на температуру воздуха центра и севера Европейской России.

На долю пылевого аэрозоля приходится более двух третей глобальной
массы аэрозолей и примерно четверть солнечной радиации, поглощаемой
всеми аэрозольными частицами в атмосфере [1]. Из глобальных выбросов
минеральной пыли 75% оседает на суше и 25% – в океане. Минеральные
вещества пустынной пыли оказывают воздействие на биогеохимию океана и
суши, активно участвуя в процессах, связанных с круговоротом энергии,
углерода и воды [1–4]. Суммарное радиационное воздействие пылевого
аэрозоля оценивается в -0.5 ± 0.4 Вт/м² [4].

Атмосферная пыль – основной источник поступающих в моря извне
питательных веществ и следовых количеств металлов, необходимых для
всех форм жизни и влияющих на первичную продукцию океана
(фитопланктон). Это ключевой метаболический процесс, запускающий в
океанах биогеохимические циклы, включая круговорот углерода, серы,
фосфора и кремния. Атмосферное осаждение пыли обеспечивает снижение

дефицита железа и фосфора в океанических экосистемах, тропических лесах и лугах, влияя на их биопродуктивность [2, 3]. Негативное влияние поступающей из атмосферы минеральной пыли связано с усилением роста и вредоносным цветением водорослей, стрессовым состоянием коралловых рифов, а также с переносом вредных бактерий, вирусов, радиоактивных и токсичных веществ, тяжелых металлов и других опасных элементов и загрязнением ими почв, водоемов и атмосферного воздуха в удаленных регионах [1–3].

Основными источниками пылевых аэрозолей являются аридные и семиаридные районы Земного шара, расположенные, главным образом, в субтропическом поясе и обедненные растительностью. От центральных и северных областей Европейской части России (ЕЧР) пустыни и полупустыни достаточно удалены. Однако изредка возможен атмосферный перенос аэрозолей из опустыненных зон Арало-Каспийского региона (АКР) [5–7]. Экспериментально эпизоды дальнего переноса аридного аэрозоля в Московский регион были обнаружены при анализе непрерывных рядов данных о массовой концентрации приземных аэрозолей $PM_{2.5}$ и PM_{10} в Москве и пригороде по результатам комплексных исследований приземных аэрозолей в ИФА им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) и измерений на сети автоматизированных станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (МЭМ).

Результаты наземных наблюдений совместно с данными траекторного анализа [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>] и реанализа MERRA-2 [<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>] за период 2011–2024 гг. позволили выявить 8 эпизодов дальнего переноса пылевого аэрозоля из районов пыльных бурь в АКР через территорию ЕЧР (табл.), включая Московский регион. Их длительность составляла 3–10 суток, и концентрация PM_{10} была выше ПДК (60 мкг/м^3). Наиболее продолжительный такой эпизод экспериментально исследован и подробно описан в [6].

Анализ карт пространственного распределения AOT_{550} атмосферной пыли, ее приземной концентрации и содержания в столбе атмосферы, а также обратных траекторий движения воздушных масс показал, что выявленные эпизоды дальнего переноса пыли отличаются не только сезонами, длительностью и количественными характеристиками, но и дальностью воздействия.

В таблице приведены некоторые статистические показатели: среднемесячная массовая концентрация аэрозолей PM_{10} в те месяцы, когда наблюдался дальний перенос аридного аэрозоля, максимальное превышение над ней PM_{10} во время эпизода, величины отклонения (в год эпизода) температуры воздуха и количества осадков от их среднемесячных многолетних значений за этот месяц. Серым фоном выделены эпизоды с наибольшей дальностью распространения атмосферной пыли.

Было установлено, что только в двух эпизодах за исследуемый

многолетний период воздушные массы, содержащие аридный аэрозоль, достигали северных регионов РФ, входящих в западный сектор Российской Арктики: весной 2015 г. и в декабре 2023 г. (рис. 1, 2). Следует отметить, что впервые явление дальнего атмосферного переноса пыли из АКР в Арктическую зону ЕЧР в марте 2008 г. экспериментально подтверждено результатами детальных минералогических, геохимических, палинологических, диатомологических и метеорологических исследований и описано в работе [8]. Дополнительные сведения об этом эпизоде также включены в таблицу.

Таблица. Некоторые показатели, характеризующие эпизоды дальнего атмосферного переноса пыли из АКР

Дата эпизода (продолжит., сут.)	PM ₁₀ <i>ср.</i> , мкг/м ³	PM ₁₀ <i>max</i> – PM ₁₀ <i>ср.</i> , мкг/м ³	Осадки, мм/мес, Р – Р _{ср.}	Температура воздуха, °С, Т – Т _{ср.}
23.03.–27.03.2008 (5)	25	26	–17–9	–1–9
29.04.–31.04.2014 (3)	39	51	–25–1	–0–4
30.03.–02.04.2015 (4)	48	180	–24–9	2–1
10.06.–15.04.2016 (6)	38	64	–13–1	0–7
26.03.–30.03.2020 (5)	43	145	10–1	3–9
05.10.–14.10.2020 (10)	37	100	–7–6	2–7
06.12.–12.12.2020 (7)	21	46	–29–4	–1–2
14.12.–16.12.2023 (3)	15	45	28–6	–0–6
15.03.–18.03.2024 (4)	26	71	–32–9	3–1

На рис. 2 показаны временные вариации во время развития эпизодов 2015 и 2023 гг. среднесуточной массовой концентрации пыли в Москве и Пинеге, полученные по данным реанализа MERRA-2, а также среднесуточной массовой концентрации аэрозолей PM₁₀ в Московском регионе (МЭМ, ИФА РАН, ЗНС ИФА РАН). В 2015 г. анализировались данные измерений на сети АСКЗА МЭМ, в 2023 г. – результаты собственных наблюдений ИФА РАН.

Наряду с комплексными наблюдениями приземных аэрозолей в Московском регионе, в Северо-Западном отделении Института океанологии им. П.П. Ширшова проводились исследования геохимических характеристик снежного покрова западного сектора Российской Арктики: на территории Кольского полуострова, Архангельской обл. и Ненецкого Автономного округа. При отборе пробы снега в марте 2024 г. на территории заповедника «Пинежский» в толще снежного покрова обнаружен слой снега, имеющий охряную окраску, выпавший в декабре 2023 г. [9]. В общей толще снега содержание взвеси невелико: 3.6–3.8 мг/л и близко к среднему значению для западного сектора Российской Арктики [10]. В окрашенном снеге содержание взвеси высокое, 199 мг/л. Установлено, что окрашенный

снег сильно обогащен растворимыми формами кремния по сравнению с усредненными пробами (48.1 и 5.1 мкгSi/л соответственно). Выявлена также значительная концентрация фосфора (56.7 мкгP/л) за счет более высокого содержания фосфатов. Концентрация органического фосфора в прослойке окрашенного снега – выше в 2.5 раза, содержание общих и органических форм азота – выше в 2 раза.

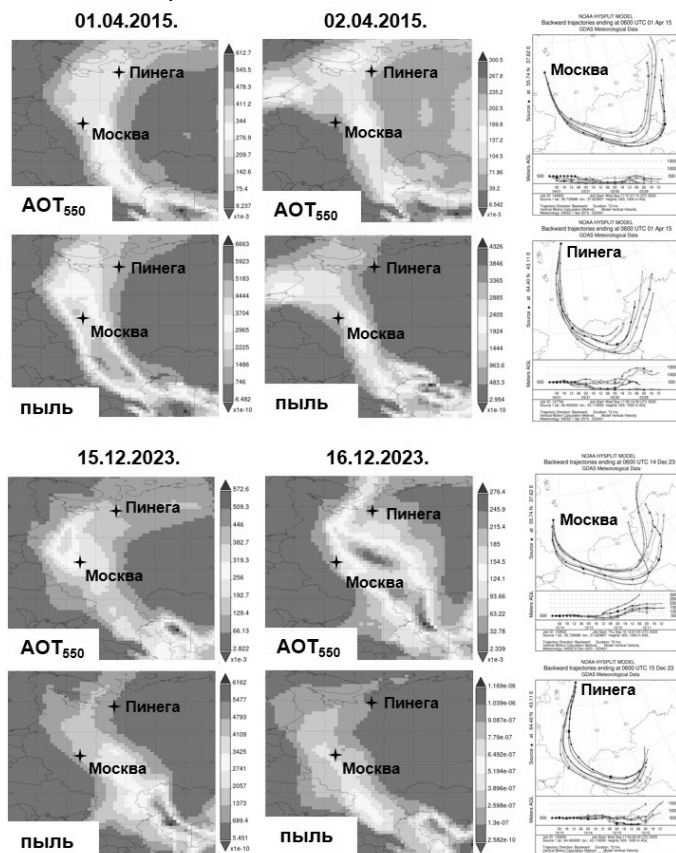


Рис. 1. Пространственной распределение AOT_{550} и приземной массовой концентрации пыли, а также трехсуточные обратные траектории движения воздушных масс в пункты прихода Москву и Пинегу (высота траекторий 500 м) во время максимального развития эпизодов дальнего переноса над ЕЧР аридного аэрозоля из АКР в апреле 2015 г. и декабре 2023 г.

Исследование с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3 SEM (TESCAN) с микроанализатором (микрозондом) INCA Energy (Oxford Instruments Analytical) показало, что после фильтрации прослойки

талого желтого снега фильтр плотно завален минеральными окатанными зернами (рис. 3а). Выявлено большое количество минералов Ca, Al, Si и два редких минерала – предположительно апатит (Ca, P, REE) и циркон. В образце много кварца и минералов титана, по внешнему виду минеральных зерен он не очень отличается от образца усредненной пробы (рис. 3б), где на фильтре обнаружены преимущественно минеральные частицы широкого спектра размеров (до 20 мкм). Среди минералов выделяются кварц, полевые шпаты и другие алюмосиликаты, а также минералы титана и железа, фрагменты растений и редкие сферы сгорания.

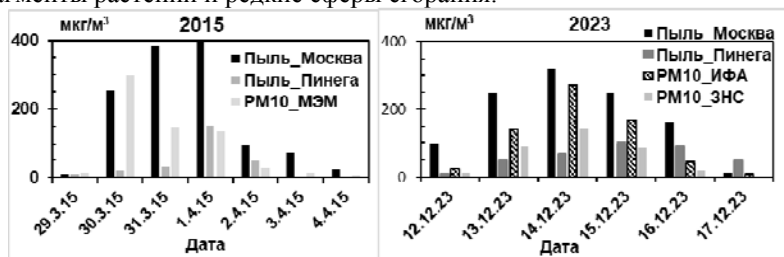


Рис. 2. Вариации среднесуточной массовой концентрации пыли в Москве и Пинеге (по данным реанализа MERRA-2) и приземного аэрозоля в Москве и пригороде (по данным наблюдений в ИФА РАН) в периоды развития эпизодов дальнего атмосферного переноса пыли из АКР

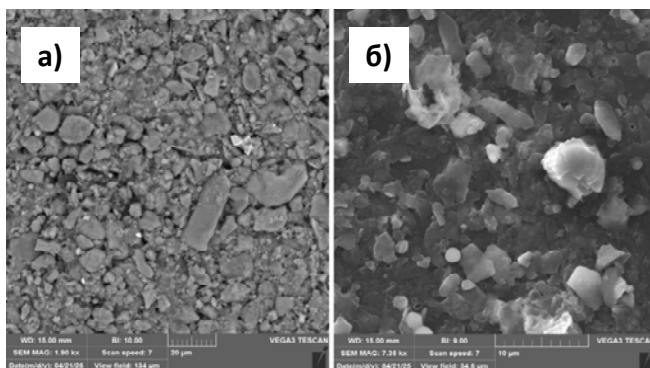


Рис. 3. Микроэлектронные фотографии нерастворимого вещества на фильтре с пробами талого снега: а) прослойка желтого снега; б) усредненная проба снега

Полученные результаты хорошо соответствуют данным о минеральном составе снега 2008 г. [8] и экспериментально подтверждают факт дальнего переноса атмосферной пыли и примесей из аридных зон АКР в западный сектор Российской Арктики в декабре 2023 г.

Авторы выражают признательность руководству ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставленную возможность доступа к базе данных измерений на сети АСКЗА в Москве.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН № 125020501413-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adebisi A.A., J.F. Kok, B.J. Murray et al. A review of coarse mineral dust in the Earth system // *Aeolian Research*. 2023. V. 60. 100849.
2. Kok J.F., Storelvmo T., Karydis, V.A. et al. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change // *Nat. Rev. Earth Environ*. 2023. V. 4. P. 71–86.
3. Mahowald N.M. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate // *Science*. 2011. V. 334. P. 794–796.
4. Shao Y., Wyrwoll K.-H., Chappell A. et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science // *Aeolian Research*. 2011. V. 2 (4). P. 181–204.
5. Shukurov K.A., Simonenkov D.V., Nevzorov A.V. et al. CALIOP-Based Evaluation of Dust Emissions and Long-Range Transport of the Dust from the Aral–Caspian Arid Region by 3D-Source Potential Impact (3D-SPI) Method // *Remote Sens*. 2023. V. 15. 2819.
6. Gubanova D., Chkhetiani O., Vinogradova A. et al. Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region during fall 2020 // *AIMS Geosciences*. 2022. V. 8 (2). P. 277–302.
7. Виноградова А.А., Губанова Д.П., Лезина Е.А., Иванова Ю.А. Пылевой аэрозоль из районов Северного Прикаспия в приземном воздухе центра Европейской России // *Оптика атмосф. и океана*. 2024. Т. 37 (6). С. 453–460.
8. Шевченко В.П., Коробов В.Б., Лисицын А.П. и др. Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.) // *ДАН*. 2010. Т. 431. № 5. С. 675–679.
9. Губанова Д.П., Котова Е.И., Виноградова А.А. Дальний атмосферный перенос пыли из Прикаспия в Арктическую зону Европейской части России в декабре 2023 года // *ДАН. Науки о Земле*. 2024. Т. 519. № 2. С. 133–140.
10. Котова Е.И., Стародымова Д.П., Лохов А.С., Нецбетаева О.П. Состав взвеси в снежном покрове западного сектора Российской Арктики // *Лед и снег*. 2024. № 4. С. 591–601.

Experimental data confirming the rare phenomenon of long-range arid aerosol transport to the western sector of the Russian Arctic are analyzed. The characteristics of dust particles in the atmosphere, the morphology and mineral composition of snow samples in the Arkhangelsk region, as well as the effect of this phenomenon on the air temperature in the center and north of European Russia are discussed.

Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Долгая А.А.

(Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, e-mail: keg@kscnet.ru)

Вынос растворенного вещества рекой Камчатка в Тихий океан (п-ов Камчатка)

Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Dolgaia A.A.

(Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky)

Flux of the dissolved components by the Kamchatka River into the Pacific Ocean (Kamchatka Peninsula)

Ключевые слова: речной сток, макрокомпоненты, микроэлементы, Тихий океан

Ежегодно в Камчатский залив Тихого океана с водами р. Камчатка выносятся ~2 Мт растворенного вещества. Привнос элементов имеет поступательный характер, увеличиваясь от истоков к устью, ~85% от общего объема растворенного вещества поступает в водоток с поверхностными и грунтовыми водами в районе расположения активных вулканов Северной группы вулканов.

Поверхность Земли эволюционирует под действием геологических, химических, физических и биологических процессов, которые тесно взаимосвязаны при превращении коренных пород во вторичные минералы. Этот сложный “механизм” контролирует эволюцию почв, форму ландшафтов и речной перенос растворенных и твердых частиц с континентов в океаны. Химическое выветривание силикатных пород вулканических провинций играет ключевую роль в поступлении элементов в океан и в регулировании различных геохимических циклов.

Полуостров Камчатка является одним из наиболее активных звеньев тихоокеанского вулканического пояса “Огненное кольцо”. Здесь насчитывается более 240 голоценовых вулканических центров, из которых 29 являются действующими в настоящее время. Вулканическими постройками занято около 90 000 км², что составляет одну треть часть полуострова.

Для Камчатки характерна разветвленная гидрографическая сеть. Реки региона относятся к бассейнам Берингова и Охотского морей и Тихого океана. Вулканические хребты обуславливают ориентировку рек с внешних склонов в широтном направлении. Главной водной артерией полуострова является р. Камчатка (рис. 1). Она формируется двумя истоками на восточном склоне Срединного хребта и предгорьях Восточного вулканического пояса. В среднем течении река огибает с западной и северной стороны Ключевскую группу вулканов, принимая воды всех постоянных и временных рек, дренирующих склоны самых активных вулканов полуострова. Впадает в Камчатский залив Тихого океана в 2 км ниже п. Усть-Камчатск. Протяженность р. Камчатка составляет 758 км,

площадь водосбора оценивается в 55 900 км² [1]. Средний многолетний расход по данным Камчатского УГМС за период 1980–2008 гг. в урочище Щеки (в районе впадения р. Ильчинец) составляет 859 м³/с [2]. Расход в предустьевой зоне опубликован только по данным 1960-х гг. [1] и составляет 980 м³/с.

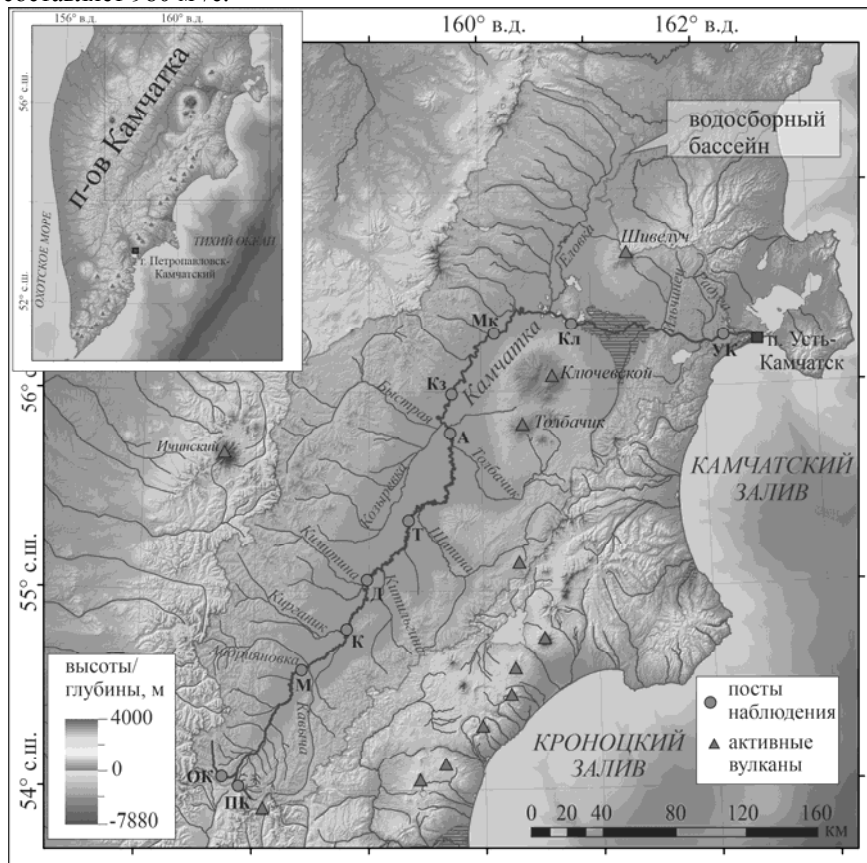


Рис. 1. Полуостров Камчатка с местоположением района исследования и водосборная площадь р. Камчатка с размещением основных постов наблюдения за химическим составом речных вод.

В ходе экспедиционных работ 2021–2024 гг. была опробована р. Камчатка от истоков до устья на ключевых участках, определяющих основные факторы формирования химического состава реки (рис. 1). Наблюдения в меженный период показали, что во всех точках опробования ее воды пресные с минерализацией менее 150 мг/л и содержанием диоксида кремния 20–25 мг/л. На всем протяжении вода реки имеет близонейтральный

pH (6.4–7.5), относится к гидрокарбонатному кальциевому типу. В верхнем течении р. Камчатка характеризуется низкой минерализацией, не превышающей 80 мг/л (р. Правая Камчатка (ПК)) и 60 мг/л (р. Озерная Камчатка (ОК)). Ниже с. Мильково (посты К, Д), за счет впадения левых притоков (р. Кирганик и р. Большая Кимитина), минерализация увеличивается до 100 мг/л и (на фоне постепенного повышения расхода) остается достаточно постоянной до п. Таежный (пост Т). После поступления с правой стороны вод р. Щапина, дренирующей очаги разгрузки одноименной крупной гидротермальной системы, а также рек Толбачик и Студенка, формирующихся на склонах активных вулканов Ключевской группы, количество растворенных солей увеличивается до 140–145 мг/л (по измерениям в с. Майское (пост Мс)). После впадения самого крупного притока (р. Еловка), характеризующейся крайне низким количеством растворенных солей, а также ряда других рек Срединного хребта, минерализация снижается. В районе п. Ключи (пост Кл) эта величина воды в р. Камчатка в среднем составляет 120 мг/л. В нижнем течении (пост УК) наблюдается некоторый рост минерализации, поставщиком минеральной компоненты служит преимущественно р. Большая Хапица, основной сток которой формируется на восточном склоне Ключевской группы вулканов.

Суммарное количество микроэлементов в истоках р. Камчатка и до с. Долиновка (пост Д) в среднем составляет ~120 мкг/л. Значительное их увеличение наблюдается при приближении реки к Ключевской группе вулканов (644 мкг/л в точке опробования с. Майское (пост Мс)). Резкий скачок в количестве микроэлементов наблюдается в районе п. Ключи (пост Кл) (до ~2 мг/л) и снижение до ~700 мкг/л в устье реки (пост УК).

Содержание большинства микроэлементов в нижнем течении реки выше, чем в верхнем, а в среднем (от п. Атласово (пост А) до с. Майское (пост Мс)) концентрации ряда элементов в одном литре воды превосходят значения в устье. Так, здесь наблюдаются аномально высокие содержания As (до 70 мкг/л), тогда как в приустьевой зоне остается только 10 мкг/л, и Cd – 2.5 и 0.06 мкг/л, соответственно. В районе п. Ключи (пост Кл) выявлены максимальные концентрации железа (860 мкг/л), фосфора (121 мкг/л), алюминия (620 мкг/л). Содержания Ti, Mn, Zn, Sr и Pb находятся в диапазоне от 10 до 50 мкг/л; Li, V, Cu, Rb, Ba, включая суммарное значение редкоземельных, – не превышают 10 мкг/л; концентрации остальных элементов – менее 1 мкг/л.

На основании данных измерения 2022 г., включая гидрохимическое опробование и гидрометрические работы, был рассчитан прирост растворенного вещества по руслу реки и годовой ионный сток с водосборной площади р. Камчатка в Камчатский залив Тихого океана (рис. 2).

Ежегодно в Камчатский залив Тихого океана с водами р. Камчатка выносится около 2 мегатонн (Мт) растворенного вещества. Практически

85% от общего объема поступает в водоток с поверхностными и грунтовыми водами в районе Ключевской группы вулканов. Распределение по отдельным элементам носит поступательный характер, увеличиваясь от истоков к устью. Наиболее ярко это выражается в количественных оценках летучих (аниогенные) и основных породообразующих элементов.

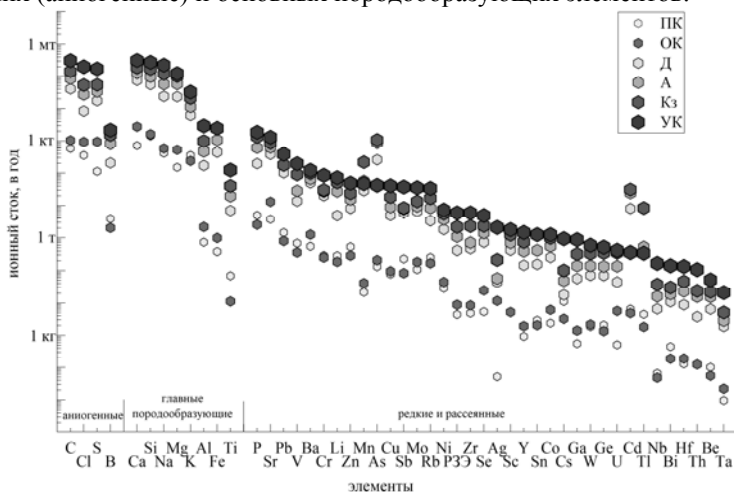


Рис. 2. Годовой элементный сток по руслу р. Камчатка на отдельных участках.

Ежегодный объем основных аниогенных элементов (Cl, S и C), поступающих с р. Камчатка в Камчатский залив, составляет ~200, ~170 и ~310 килотонн (Кт), соответственно. Количество бора на два порядка ниже – 2.2 Кт/год. Каждый год в Камчатский залив поступает ~1 Мт главных породообразующих элементов. Сравнение данных на разных участках показывает, что в верхнем и среднем течении катионами р. Камчатка обогащается только на 20% от общего объема выносимого растворенного вещества. Еще 40% набирает на участке Долиновка–Козыревский мост, остальные 40% приходятся на нижнее течение. Индивидуальные потоки основных породообразующих элементов (Fe, Al, Na, Mg, Ca, K, Si) находятся в диапазоне от 32 Кт/год (K) до 315 Кт/год (Ca).

Количество выносимых рекой микроэлементов составляет ~4.3 Кт/год, из них 3.3 Кт (75% от общего объема) приобретает на Ключевском участке. Больше всего в Камчатский залив выносятся фосфора и стронция (1.9 и 1.3 Кт/год, соответственно). На участке Атласово–Козыревский мост в реке наблюдаются аномально высокие объемы мышьяка (1.3 Кт/год), тогда как сквозь створ в нижнем течении проходит только 40 т/год. Больше ста тонн свинца, ванадия и бария ежегодно поступает в Тихий океан с водами р. Камчатка, хрома и лития – по ~80 т, цинка, марганца, меди,

молибдена – по ~40 т. Количество редкоземельных элементов, никеля, селена – от 4 до 7 т.

Учитывая, что в среднем состав пород, распространенных в бассейне р. Камчатка достаточно однороден, можно сделать предположение, что повышенный сток обусловлен преимущественно растворением и/или выщелачиванием продуктов современных извержений Северной группы вулканов. Нельзя исключать вклад гидротермальной деятельности, развитой на водосборной площади р. Камчатка, в обогащение речных вод рядом компонентов. Как показано нами ранее на примере р. Карымская [3], поступление растворенного вещества в речную сеть с термальными водами может иметь ключевое значение в формировании гидрохимического типа поверхностных вод. Однако, все крупные гидротермальные системы бассейна р. Камчатка разгружаются в долинах ее притоков и для оценки термальной составляющей в составе воды необходимо провести дополнительные исследования по изучению макро- и микроэлементного составов этих рек.

Работа проведена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме “Мониторинг влияния вулканической и гидротермальной активности на химический состав рек Камчатки” (FWME-2024-0014) выполняемой по “Межведомственной программе комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024–2026 гг.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 367 с.
2. Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л. Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 32. С. 73–78.
3. Калачева Е.Г., Мельников Д.В., Долгая А.А., Волошина Е.В. Формирование химического состава воды р. Карымская под влиянием гидротермальной и вулканической деятельности (п-ов Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2024. № 2. С. 40–58.

Every year in the Kamchatka Bay of the Pacific Ocean with the waters of the river. Kamchatka is carried out ~ 2 Mt of the dissolved substance. The recess of elements is progressive, increasing from the sources to the mouth, ~ 85% of the total volume of the solution of dissolved substance enters the waterway with surface and groundwater in the area of the active volcanoes of the Northern volcano group.

Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Котенко Т.А., Долгая А.А.

(Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, e-mail: keg@kscnet.ru)

Вынос Cl и S с речным стоком и оценка химической эрозии о. Парамушир (Курильские острова)

Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Kotenko T.A., Dolgaia A.A.

(Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky)

Flux Cl and S with river runoff and assessment of chemical erosion about. Paramushir (Kuril Islands)

Ключевые слова: речной сток, химическая эрозия, летучие элементы, Охотское море, Тихий океан

Получены количественные оценки выноса Cl и S с речным стоком и химической эрозии о. Парамушир. На основе прямых измерений показано, что, помимо гидротермального стока магматических летучих с активных вулканов, существуют дополнительные источники серы и хлора, а скорость химической эрозии вулканических построек с участием ультракислых вод больше чем на порядок превышает скорость выветривания пресными поверхностными водами.

Активные вулканы Курильских островов характеризуются интенсивной гидротермальной деятельностью, связанной с дегазирующими близповерхностными магматическими телами. Принимая во внимание, что анионный состав ультракислых термальных вод формируется за счет растворения вулканических газов в подземных водах, гидротермальный вынос Cl и S с речным стоком может играть определенную роль в балансе летучих вулканических дуг. Вместе с тем, химическая эрозия вулканических пород в областях недавнего и современного вулканизма является одним из наиболее интенсивных типов силикатного выветривания. Гидротермальные процессы в постройках активных вулканов увеличивают скорость взаимодействия воды и горных пород. Связанный с этим вынос растворенных веществ (катионов + SiO_2) поверхностными потоками влияет не только на стабильность вулканических построек, но и на химический состав омывающих острова морей и океанов.

В ходе экспедиционных работ разных лет были проведены гидрологические работы и опробование на реках ряда островов Курильской гряды. Опробованием охвачены также озера и выходы термальных и холодных подземных вод в долинах отдельных рек и в береговых обрывах островов. Наибольшая информация получена по о. Парамушир. Это один из наиболее крупных Курильских островов с площадью более 2000 км². В пределах острова расположены более десяти вулканов четвертичного возраста, пять из которых (Эбеко, Чикурачки, Татаринова, Карпинского и Пик Фусса) являются действующими. Вулканические постройки сливаются

своими основаниями и образуют вытянутые вдоль острова хребты Вернадского, Карпинского, Левинсона-Лессинга. Все четвертичные образования сложены породами, имеющими состав от базальтов до андезитов. Вулканы Чичурачки и Пик Фусса – молодые стратоконусы с частыми эксплозивными вершинными извержениями и отсутствием явных признаков вулcano-гидротермальных систем. Вулканы Эбеко, Татаринова и Карпинского представляют собой комплексные вулканические структуры с фумарольными полями на вершинах и разнообразными термопроявлениями на склонах.

Реки о. Парамушир впадают в Охотское море и Тихий океан. Основными водоразделами служат вулканические хребты, определяющие ориентировку долин рек в широтном направлении. Химический состав рек о. Парамушир определяется тремя основными факторами: а) атмосферным привносом, б) поверхностным низкотемпературным выветриванием свежих и измененных пород, в) смешением с термальными водами, разгружающимися в долинах рек. По физико-химическим показателям воды водотоков делятся на три группы: 1) пресные воды с $TDS < 50$ мг/л, pH от 6.5 до 7.5 и составом $Na(Ca)-HCO_3$; 2) кислые сульфатные воды с минерализацией до 300 мг/л; 3) ультракислые воды $Cl-SO_4$, обогащенные катионами, в том числе Fe и Al.

Наиболее минерализованной с самым низким значением pH рекой острова является р. Юрьева. Река собирает воды Верхне-Юрьевских термальных источников и нескольких небольших притоков и впадает в Охотское море с расходом $1.5-2.0$ м³/с. Выше расположения источников, вода реки имеет минерализацию 230 мг/л и температуру 8°C, слабокислую реакцию (pH = 4.1). В составе воды среди катионов преобладает Ca^{2+} , среди анионов – SO_4^{2-} . Дебит реки на этом участке составляет 15 л/с. По мере поступления в основное русло термальных и холодных кислых вод происходит трансформация химического состава и основных физико-химических показателей речных вод. Многократно возрастает минерализация, снижается pH, увеличивается температура воды. В итоге, концентрация сульфат-ионов в устье реки в межень достигает 1.8–2 г/л, хлорид-ионов – 0.5–0.7 г/л, что составляет суточный вынос ~340 т (SO_4) и ~110 т (Cl) (рис. 1).

Повышенными величинами выноса хлора и сульфата, помимо рек, формирующихся на склонах вулкана Эбеко, отличается р. Трудная, берущая начало на внешнем склоне вулкана Карпинского (9 т/сутки (Cl) и 15.2 т/сутки (SO_4)). Данные о гидротермальной деятельности в долине этой реки отсутствуют, но повышенные содержания ряда компонентов, включая F⁻ (1.8 мг/л), позволяют сделать предположение о наличии разгрузки кислых сульфатно-хлоридных вод, подобных Верхне-Юрьевским источникам, но не столь мощных, в долине этой реки. Суммарный гидротермальный вынос магматических летучих с о. Парамушир, осуществляемый реками,

дренирующими активные термальные поля вулканов и отдельные группы источников, составляет ~150 т/сутки (Cl) и ~170 т/сутки (S). Более 70 % приходится на небольшую р. Юрьева, принимающую воды Верхне-Юрьевских источников.

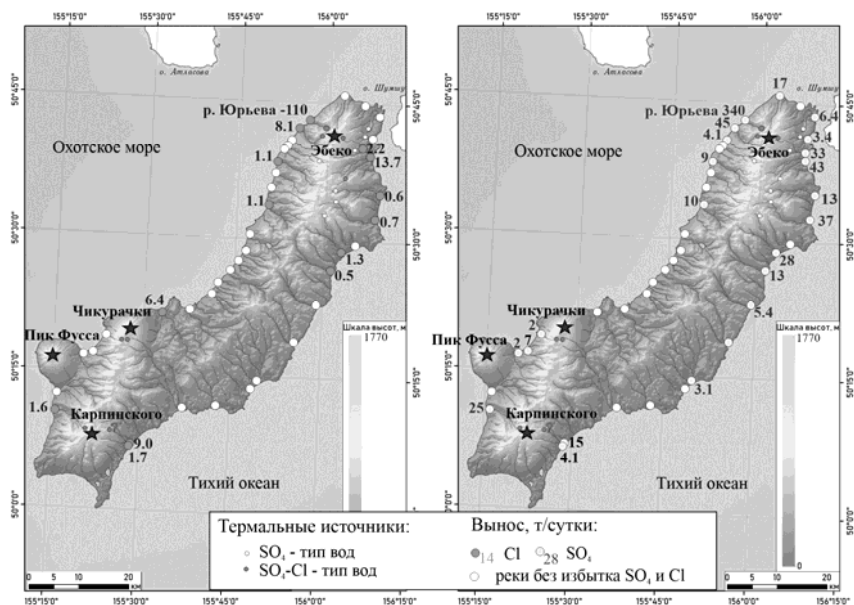


Рис. 1. Гидротермальный вынос хлора и серы (как SO₄) с острова Парамушир в акваторию. Знаком вопроса отмечено место, где в верховьях р. Трудная находится предполагаемая разгрузка ультракислых сульфатно-хлоридных вод.

Для того, чтобы показать возможность взаимосвязи между реками, дренирующими активные гидротермальные системы, и другими реками с захватом хлора и серы из других источников (например: выщелачивание вмещающих пород (как неизмененных, так и претерпевших изменения за счет гидротермальных процессов) или дополнительный привнос с морскими аэрозолями) проведены расчеты по всем опробованным рекам о. Парамушир, в которых наблюдается избыток хлорид- и сульфат-ионов (рис. 1).

В результате выявлено, что дополнительный сток растворенного хлора с остальными реками составляет 25 т/сутки (~15% от гидротермального), а серы 60 т/сутки (~35% от гидротермального). Максимальные потоки хлора (более 1 т/сутки) осуществляются реками, берущими начало на склонах потухших вулканов Вернадского и Билибина, где существуют обширные старые сольфатарные поля. Наибольшее количество серы выносятся

реками, дренирующими крупные зоны гидротермально измененных пород, широко развитых в осевой части хребта Вернадского.

На рис. 2 показаны количественные оценки поступления макрокатионов с речными водами в акваторию о. Парамушир. По данным 2017–2022 гг., общий вынос растворенных катионов вместе с SiO_2 в речных водах о. Парамушир составляет ~500 т/сутки.

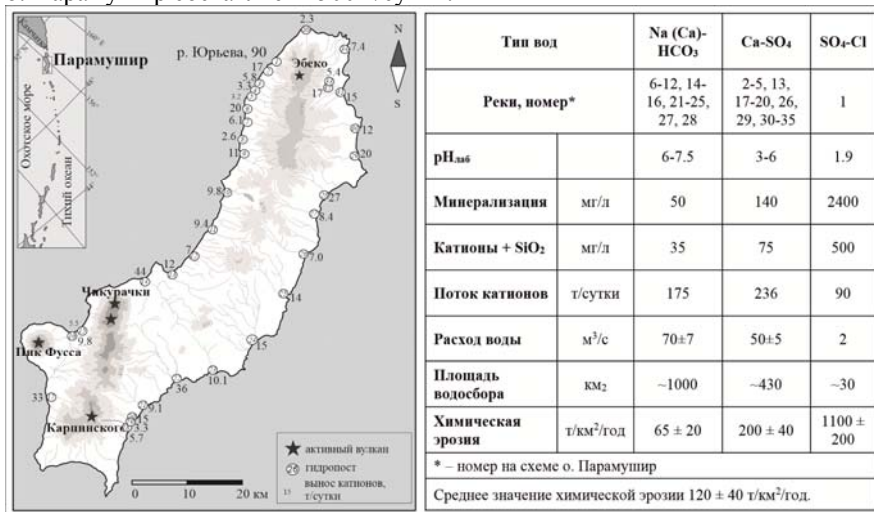


Рис. 2. Схема о. Парамушир с точками опробования и речным выносом катионов (т/сутки).

Для определения объемов химического выветривания о. Парамушир, весь остров был разбит на отдельные участки, соответствующие водосборным бассейнам отдельных рек или групп водотоков, характеризующихся близким химическим составом. Для расчетов использованы данные, включающие катионы (Na, K, Ca, Mg, Al и Fe) и SiO_2 с поправкой на концентрации этих элементов в дождевых водах, а также величины расходов рек (в $\text{м}^3/\text{с}$). Измерение расходов (ошибки измерений, как правило, 10-15 % и зависят от сложности створа и величины расхода) проводилось в конце июля – начале августа.

Концентрации растворенных катионов (+ SiO_2) в речных водах первого типа (поверхностный поток) колеблются от 25 до 45 мг/л (35 мг/л – средняя концентрация) (Рисунок 2). Общий расход рек этого типа составляет $70 \pm 10 \text{ м}^3/\text{с}$. Суммарный вынос породообразующего компонента этими потоками составляет ~175 т/сут. С учетом площади острова, на котором расположены реки этого типа (~1000 км²), поверхностное низкотемпературное выветривание пород можно оценить в $65 \pm 20 \text{ т/км}^2/\text{год}$.

Среднее содержание растворенных катионов (+ SiO_2) в водах кислых рек сульфатного состава составляет 75 мг/л, при общем расходе в $50 \pm 5 \text{ м}^3/\text{с}$. Это дает смешанную эрозию районов острова, подвергшихся гидротермальному метаморфизму, равную $200 \pm 40 \text{ т/км}^2/\text{год}$, что в три раза выше, чем для пресных вод при меньшем общем расходе сульфатных водотоков.

Река Юрьева с ультракислой водой хлоридно-сульфатного состава выносит ежедневно около 90 тонн растворенных веществ (SiO_2 , Na, K, Ca, Mg, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и Al^{3+}), определяющих катионный состав ее вод. Это примерно пятая часть от общего выноса породообразующих компонентов водотоками о. Парамушир. Площадь распространения ультракислых термальных вод ограничивается постройкой вулкана Эбеко ($\sim 2\%$ от общей площади). Следовательно, химическая эрозия с участием этих вод в 10 раз выше, чем средняя по острову и составляет около $1100 \pm 200 \text{ т/км}^2/\text{год}$.

Таким образом, на основе результатов гидрохимического опробования и гидрометрических измерений, выполненных в устьях рек о. Парамушир, определена общая гидротермальная разгрузка магматического хлора, которая составляет 150 т/сутки. Измеренный гидротермальный поток серы составляет 170 т/сутки, погрешность измерений составляет 15%. Реками, дренирующими зоны гидротермально измененных пород, может выноситься дополнительно до 35% от объема поступления серы с термальными водами активных вулканов. Оценка поверхностной химической эрозии острова практически в 10 раз превышает среднюю скорость силикатного выветривания в глобальном масштабе, определенного в $7 \text{ т/км}^2/\text{год}$. Оценка гидротермальной эрозии самая большая из известных и составляет $1100 \pm 200 \text{ т/км}^2/\text{год}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме НИР “Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минерало-рудогенеза” (FWME-2024-0006).

The quantitative estimates of the CL and S removal with river runoff and chemical erosion of the Paramushir Island were obtained. It is shown that, in addition to hydrothermal flow of magmatic volatiles from active volcanoes, there are additional sources of sulfur and chlorine. The rate of chemical erosion of volcanic edifices by ultra acid waters is more than an order of magnitude exceeds the rate of weathering with fresh surface waters.

Килесо А.В.^{1,2}, Гриценко В.А.¹

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

gritsenko_vl_al@mail.ru; ²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград)

Короткоживущий адвективно-струйный механизм кросс-склонового переноса взвеси в прибрежной зоне моря у берегов Калининградской полуострова

Kileso A.V.^{1,2}, Gritsenko V.A.¹

(¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow; ²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad)

Short-term advective-jet mechanism of cross-slope transport of suspended matter in the coastal zone of the sea off the shore of the Kaliningrad Peninsula

Ключевые слова: взвесенесущие течения, транспорт песка, подводный береговой склон, цифровая модель рельефа, штормовые условия, градиентные показатели.

Анализ мелкомасштабных градиентных характеристик поверхности подводного берегового склона у отмелей песчаных берегов Калининградского полуострова позволил предположить существование нового, короткоживущего адвективно-струйного механизма переноса взвешенного материала в сторону моря.

Хорошо известно, что изменение поверхности подводного берегового склона и отмелей песчаных берегов Юго-Восточной Балтики определяются динамикой насыщенных взвесью прибрежных вод. Факты наличия песка за пределами зоны ветро-волнового воздействия на дно у берегов Калининградского полуострова [1, 2] свидетельствуют о возможности транспорта взвесенесущих вод за ее границу. Инструментально зафиксированные на дне ряд морфологических особенностей в виде протяженных ложбин с кросс-склоновой ориентацией был обнаружен на поверхности подводного склона между г. Зеленоградск и п. Лесное [3], что подтверждает возможность движения песка в сторону моря.

Целью работы стала демонстрация возможности существования в условиях сочетания горизонтальной неоднородности поверхности склона дна и сильного шторма короткоживущего кросс-склонового механизма переноса взвешенного материала за пределы прибрежной зоны моря.

Для анализа мелкомасштабных особенностей поверхности дна использовались данные эхолотных промеров береговой зоны Калининградского полуострова АО ИОРАН [4]. Построенная в среде пакета ERSI ArcGis цифровая модель рельефа (далее, ЦМР) склона дна имела пространственное разрешение в 30 м и охватывала глубины до 30 м, что позволило рассчитать вдольбереговые и поперечные к берегу градиенты глубин, значения уклона дна, кривизну поверхности склона дна, а также

траектории наискорейшего спуска [5], рассматриваемые как пути потенциального движения взвесенесущих вод в сторону открытого моря. Расчеты траекторий выполнены с помощью инструментов FlowDirection и FlowAccumulation [6]. Использованный в расчетах конечно-разностный алгоритм позволил учитывать направление потоков (вода течет от высоких точек к низким) и устранять ложные впадины.

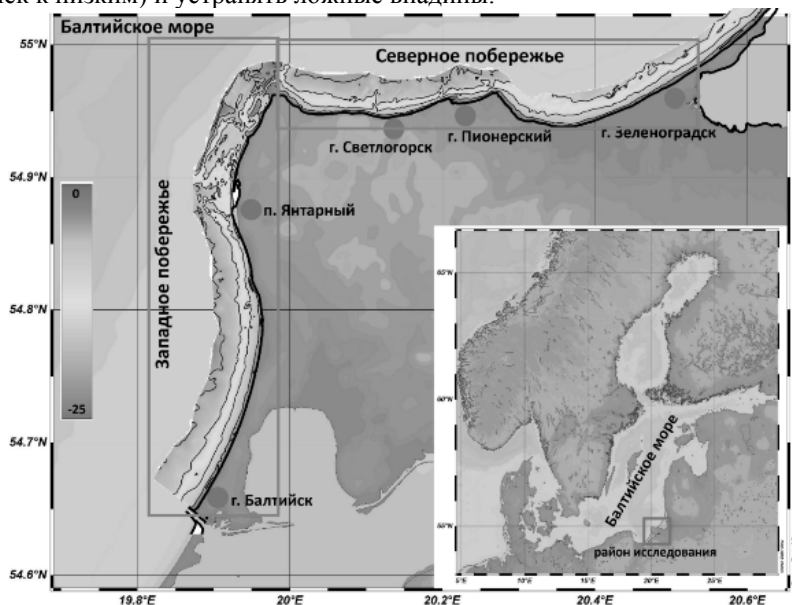


Рис. 1. Общая схема очертания берегов Калининградского полуострова и ЦМР подводного берегового склона Калининградского полуострова. Изобаты проведены с шагом 5 м. Прямоугольниками выделены участки северного и западного побережья Калининградского полуострова. Основа для карты взята из программного продукта «Ocean Data View» [7].

На северном побережье Калининградского полуострова (рис. 2) оказалось возможным выделить пять участков подводного берегового склона с характерными неоднородностями на дне. На рис. 2 данные участки выделены прямоугольниками и пронумерованы римскими цифрами. Участок I располагается в районе Светлогорской бухты от п. Отрадное до г. Светлогорск. Расчет вдольберегового градиента (рис. 2в) для данного района позволил явно выделить чередование участков с отрицательными значениями градиента, соответствующих уменьшению глубин, и положительными значениями (увеличение глубин), практически перпендикулярных береговой линии. Отрицательные значения плановой кривизны поверхности (рис. 2г), которые характеризуют ее горизонтально-

вогнутый характер перпендикулярно к направлению максимального уклона, а также полученные траектории наискорейшего спуска в данном районе отчетливо выделяют потенциальные траектории движения взвешенного материала в штормовых условиях. Уклон дна вдоль данных траекторий варьируется от 0.4 до 1°.

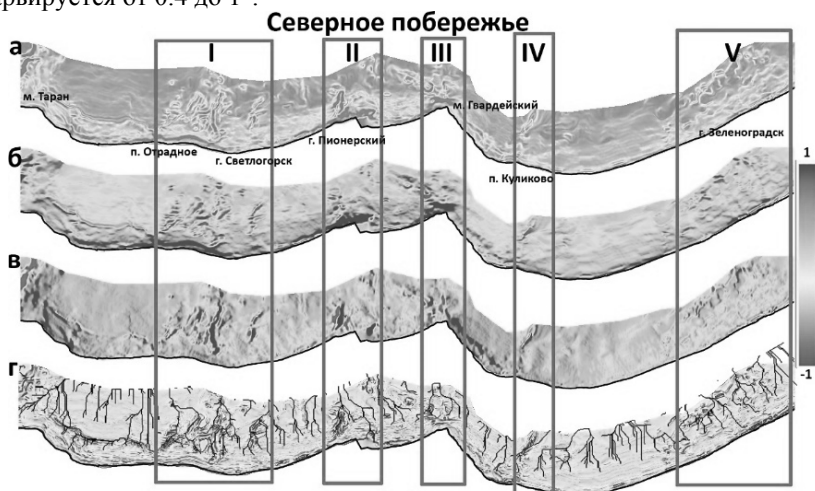


Рис. 2. Значения уклона дна (а), поперечного к берегу градиента (б), вдольберегового градиента (в), плановой кривизны и траекторий наискорейшего спуска (г) по данным ЦМР для участка северного побережья Калининградского полуострова. Участки с характерными морфологическими особенностями выделены прямоугольниками и пронумерованы римскими цифрами.

Анализ значений градиентных характеристик поверхности дна на участках II и III западнее и восточнее г. Пионерский, а также участка IV в районе п. Куликово выявил характерные ложбинообразные структуры, имеющие поперечные к берегу ориентации. Ширина данных ложбин составила 300–400 м, при уклоне дна 0.9°. Расчет вдольберегового градиента и кривизны поверхности для склона дна в г. Зеленоградск (участок V) показал сильную расчлененность топографии поверхности склона дна без наличия преобладающих траекторий наискорейшего спуска. Заметим, что описанные выше кросс-склоновые морфологические особенности топографии дна могут «работать» только при наличии у берега значительного объема насыщенных взвесью вод, что возможно [8, 9] в зоне обрушения волн в штормовых условиях.

Таким образом, сочетание негладкости поверхности склона дна и значительное по величине содержание взвеси в прибрежных водах во время сильного шторма [10] создают условия для возникновения короткоживущих

струйных вдольсклоновых взвесенесущих течений, способных порождать абразию дна и вынос взвешенного материала за пределы зоны ветроволнового воздействия на дно. Данный механизм переноса взвеси предлагается называть адвективно-струйным естественным образом дополняет ранее полученные представления о динамике взвешенного материала в условиях небольшой ветровой нагрузки на прибрежные воды объяснением кросс-склонового движения песка поперек линии берега в условиях сильного шторма. Отметим разницу во времени существования двух различных типов механизмов транспорта песка. В первом случае транспорт песка протекает длительное время при небольших по величине ветровом волнении и дрейфовых течениях, а адвективно-струйный механизм переноса песка в сторону моря существует в условиях сильных штормов всего 3–4 дня [11]. Именно такова обычно наблюдаемая длительность сильных штормов для юго-восточной части Балтики.

Описанный в работе короткоживущий адвективно-струйный механизм выноса песка за внешнюю границу прибрежной зоны моря позволил дать объяснение появлению скоплений песка в диапазоне глубин 35–40 м у берегов Калининградской полуострова.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data // *Regional Studies in Marine Science*. 2016. V. 7. P. 81–87. DOI: 10.1016/j.rsma.2016.05.011
2. Ryabchuk D., Sergeev A., Burnashev E. et al. Coastal processes of the Russian Baltic (eastern Gulf of Finland and Kaliningrad area) // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2020. V. 54. № 1. DOI: 10.1144/qjegh2020-036
3. Zhamoida V.A., Ryabchuk D.V., Kropatchev Y.P. et al. Recent sedimentation processes in the coastal zone of the Curonian Spit (Kaliningrad region, Baltic Sea) // *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Band 160 Heft 2*. 2009. V. 160. № 2. P. 143–157. DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0143
4. Килесо А.В., Демидов А.Н., Гриценко В.А. Орорафический фактор в формировании вдоль склоновых течений в Юго-Восточной Балтике // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2020. № 3. С. 100–107. EDN: YQHYOO
5. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1988. V. 54. № 11. P. 1593–1600. DOI: 0099-

1112/88/5411-1593\$02.25/0

6. ESRI ArcGIS Desktop: Release 10. Environmental Systems Research Institute, Redlands. 2011. URL: <https://www.esri.com/> (дата обращения 01.06.2024).
7. Schlitzer R. Ocean Data View. 2018. URL: <https://odv.awi.de/> (дата обращения 01.06.2024).
8. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В. Гидрогенное перемещение осадков в береговой зоне моря. М. Наука, 1991. 280 с.
9. Жиндарев Л.А., Хабидов А.Ш., Тризно А.К. Динамика песчаных берегов морей и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 271 с.
10. Юркевич М.Г. Кратковременные деформации шельфа подводного склона верхней зоны шельфа // Литодинамика, литология и геоморфология шельфа. М.: Наука, 1976. С. 257–266.
11. Бобыкина В. П., Стонт Ж. И. О зимней штормовой активности 2011–2012 гг. и ее последствиях для побережья Юго-Восточной Балтики // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 322–328. DOI: 10.7868/S0321059615030025

An analysis of the small-scale gradient characteristics of the surface of the underwater coastal slope near the shallow sandy shores of the Kaliningrad Peninsula suggests the presence of a new, short-term advective-jet transport mechanism of suspended material toward the sea.

**Клювиткин А.А.¹, Кравчишина М.Д.¹, Новигатский А.Н.¹,
Дара О.М.¹, Амбросимов А.К.¹, Коченкова А.И.¹,
Булохов А.В.¹, Иванов В.В.²**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

klyuvitkin@ocean.ru; ²МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,

vladimir.ivanov@aari.ru)

Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в ноябре 2023 г.

**Klyuvitkin A.A.¹, Kravchishina M.D.¹, Novigatsky A.N.¹,
Dara O.M.¹, Ambrosimov A.K.¹, Kochenkova A.I.¹,
Bulokhov A.V.¹, Ivanov V.V.²**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Vertical particle fluxes in the Barents Sea on November, 2023

Ключевые слова: Арктика, Атлантическая вода, седиментационные ловушки.

Представлены первые результаты исследования потоков осадочного вещества в позднеосенний период в условиях полярной ночи и интенсивного переноса вод Западно-Новоземельским течением на границе Баренцева и Карского морей по материалам краткосрочной постановки седиментационных ловушек в составе двух автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий.

Исследование рассеянного осадочного вещества необходимо для понимания процессов современного осадконакопления и расшифровки показаний такого природного палеоклиматического самописца, как донные осадки, которые формируются в процессе осаждения и дальнейшего преобразования водной взвеси в осадочную толщу [1]. Потоки вещества в океане — это основная количественная характеристика при изучении осадкообразования, которая позволяет в динамике изучать процессы осаждения частиц, преобразовании их при прохождении водной толщи, оценивать количество и состав вещества, поступающего на дно.

Краткосрочная постановка двух автоматических глубоководных обсерваторий (АГОС) с седиментационными ловушками была выполнена (рис. 1) в ходе 93-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» [2] с целью изучить сезонные потоки и состав оседающего вещества в условиях усиления адвекции вод атлантического происхождения (АВ) Западно-Новоземельским течением на границе Баренцева и Карского морей. Время работы АГОС составило 5.7 сут. с 19 по 25.11.2023 г.

Для сбора осаждающегося вещества использовались малые седиментационные ловушки МСЛ-110 площадью сбора 0.0095 м² [3]. Пробосборники заполняли фильтратом морской воды из района постановки с соленостью 45 без добавления ядовитого химического соединения,

подавляющего рост микроорганизмов. Дальнейшая обработка собранного материала выполнялась по стандартной методике [4]. Для определения параметров среды в составе АГОС были установлены акустические измерители течений Sontek Argonaut MD, CTD-профилограф SBE-37 и TD-логгеры RBRduet.

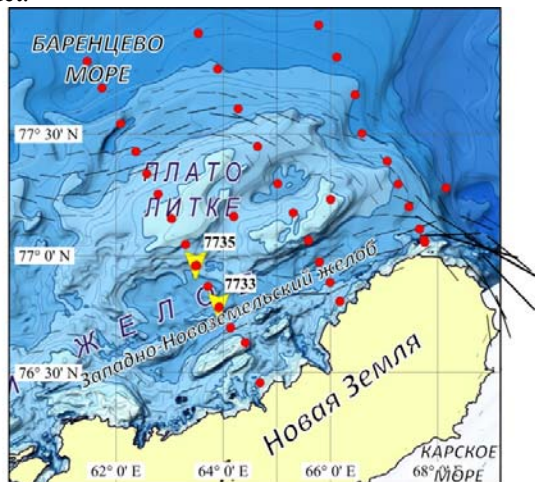


Рис. 1. Карта-схема района исследований с указанием места работы АГОС. Черными штрихами показаны векторы течений на основе реанализа.

Ст. 7733 располагалась в осевой части Западно-Новоземельского желоба на расстоянии 24 м. мили от берега, очевидно, в основном потоке АВ, переносимой из Баренцева моря в Карское (рис. 1). Скорости течения варьировали от 0 до 17.6 см/с на 56 м, до 24.2 см/с на 147 м и до 16.7 см/с на дне при среднем 11.5, 7.2 и 6.2 см/с соответственно. Перенос водных масс характеризовался постоянной северо-восточной направленностью. Приливная изменчивость течений выражена слабо, в основном в колебании скорости. Таким образом, на ст. 7733 наибольшую роль в формировании структуры течений играл квазистационарный перенос АВ на северо-восток.

Ст. 7735 располагалась в 12 м. милях к северо-западу от ст. 7733 на южном склоне плато Литке и на расстоянии 36 м. миль от берега Новой Земли. Скорости течения здесь сравнимы с данными, полученными на ст. 7733, и варьировали от 0 до 23.4 см/с на 54 м, до 22.6 см/с на 192 м и до 14.4 см/с на дне при среднем 6.5, 6.3 и 5.1 см/с соответственно. Однако, среднее направление течений менялось с юго-западного на северное и обратно, а общий перенос водных масс был направлен в противоположную сторону относительно ст. 7733 (на юго-запад) и был почти в 2 раза меньше. Средняя скорость переноса водных масс через точку постановки была почти в 2 раза ниже. На ст. 7735 влияние приливных течений отчетливо проявлено. Очевидно, что ст. 7735 находилась на периферии основного

потока АВ, где, возможно, формировались синоптические вихри.

Температура воды (Т) на ст. 7733 на 56 м изменялась от -0.15 до 1.11°C , на 147 м – от 0.47 до 0.89°C . На ст. 7735 на 54 м Т изменялась от -0.32 до 1.14°C , а на 141 м – от 0.21 до 0.80°C . При этом на разных горизонтах Т менялась независимо друг от друга, значимой корреляции не выявлено. Таким образом, МСЛ подповерхностного слоя обеих АГОС приурочены к нижней части слоя осенне-зимней конвекции, а МСЛ придонного – собирали материал в слое АВ.

Величины валовых потоков частиц изменялись в пределах $246.8\text{--}2230$ $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ (рис. 2). Минимальные значения зафиксированы в подповерхностном слое (285.9 и 246.8 $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ на станциях 7733 и 7735 соответственно), с глубиной потоки увеличивались, достигая своего максимума в придонном слое (2230.4 и 1128.9 $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ соответственно). В целом, на ст. 7733 потоки выше, чем на ст. 7735. При этом в подповерхностном слое различия минимальны. Наибольшие различия зафиксированы в придонном слое, где величины потоков на ст. 7733 почти в 2 раза превышали потоки на ст. 7735.

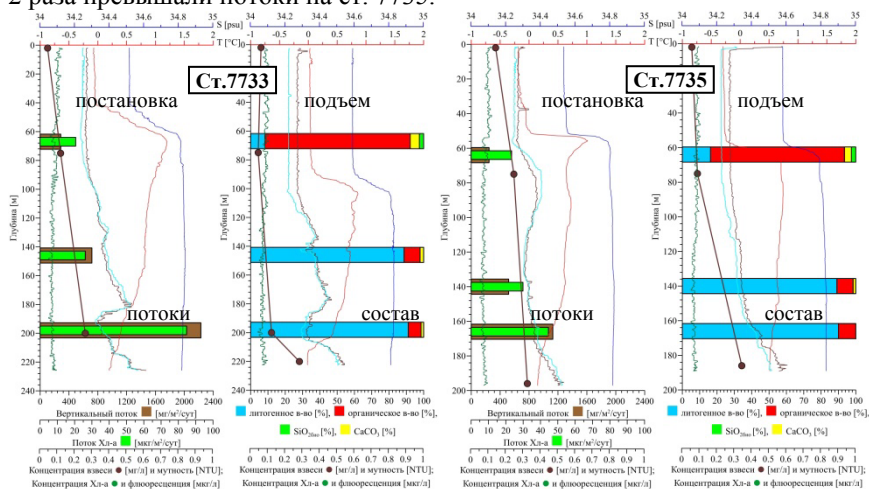


Рис. 2. Потоки вещества и хлорофилла-а, состав вещества, данные CTD-зондирований при постановке и подъеме АГОС.

На обеих станциях в составе осаждающегося вещества в подповерхностном слое преобладала биогенная компонента в основном за счет взвешенного органического вещества (ОВ). Причем содержание $C_{\text{орг}}$, на основе которого рассчитывается содержание ОВ, превышало 50%. Так, расчетное содержание ОВ при использовании общепринятого в практике исследований коэффициента 2 превышает 100% и составляет 104.6 и 103.5% на ст. 7733 и ст. 7735 соответственно, чего не должно быть. Помимо этого, в

составе потоков присутствует литогенное вещество (ЛВ) в значимом количестве (10.3 и 21.7% соответственно), а также CaCO_3 (6.6 и 5.3%) и $\text{SiO}_{2\text{био}}$ (3.0 и 3.4%). Таким образом, можно говорить, что в поверхностном слое преобладает органическое вещество, которое, однако, имеет состав, отличающийся от среднего состава морского взвешенного вещества [1].

Взвешенный карбонат кальция (CaCO_3) и биогенный кремнезем ($\text{SiO}_{2\text{био}}$) зафиксированы в значительно меньших количествах (1.5–6.6%). Причем наибольшее содержание этих компонентов относится к подповерхностному слою, а $\text{SiO}_{2\text{био}}$ в промежуточном и придонном слоях вообще не обнаружен.

В промежуточном и придонном слоях состав вещества обеих АГОС близок, но при этом резко отличается от состава вещества поверхностного слоя. Здесь подавляюще преобладает ЛВ, увеличиваясь от 89–91% в промежуточном слое до 97–99% в придонном. В составе ЛВ преобладали обломочные минералы (кварц, слюда, плагиоклаз, КППШ, амфибол, эпидот – в сумме до 69%). КППШ представлены микроклином и ортоклазом. Среди плагиоклазов диагностируется андезин и лабрадор, но основным минералом является наиболее устойчивый альбит. Диоктаэдрическая слюда мусковитового типа преобладает в группе 10-ангстремовых минералов, кроме того, диагностируется иллит в подчиненном количестве. Горизонты 146 м (ст. 7733) и 140 м (ст. 7735) маркируются присутствием амфибола (роговая обманка). Среди обломочных минералов встречается цоизит, минерал из группы эпидота. Содержание глинистых минералов достигает 45%. В этой группе диагностированы магнезиально-железистый хлорит, каолинит, щелочно-щелочноземельный монтмориллонит из группы смектита, содержание которого увеличивается в нижних горизонтах. Карбонаты представлены слабо (доломит и кальцит, 2–6%), причем только в подповерхностных горизонтах, что также отражается в увеличении содержания CaCO_3 в составе вещества (рис. 2).

Потоки хлорофилла “а” (Хл-а) варьировали в пределах 20.6–84.8 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$. Распределение потоков Хл-а, в целом, повторяло распределение валовых потоков частиц: минимум на поверхности (20.6 и 23.4 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$ на ст. 7733 и ст. 7735 соответственно), увеличение с глубиной (26.8 и 29.9 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$) и максимум в придонном слое (84.8 и 44.6 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$). При этом сами потоки Хл-а были относительно невысоки. Так в августе 2021 г. потоки Хл-а в Медвежинском желобе варьировали в пределах 120–142 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$, а в августе 2020 г. в северной части моря в пределах 60–116 $\text{мкг/м}^2/\text{сут}$ [4]. Однако, изученные в 2020–2021 гг. потоки Хл-а относятся к лету и даже к весеннему цветению, когда световой день был продолжительным, и скорость фотосинтеза была высокой. В период развития полярной ночи фотосинтез замедлялся и протекал с минимальной скоростью. Тем не менее, величины потоков в полярную ночь сопоставимы с аналогичными в летний сезон.

Обращает на себя внимание увеличение потоков Хл-а с глубиной.

Можно предположить, что высокие значения потоков Хл-а здесь обусловлены постепенным оседанием детрита из верхних слоев, а также увеличением поступления частиц в составе АВ из южной части моря, где активность фитопланктона в поверхностных водах поддерживалась сравнительно продолжительными сумерками, и увеличением влияния тепловодной атлантической флоры [5]. Дальнейшее оседание вещества на дно не происходит ввиду высокой скорости придонного течения.

Содержание Фео-а до 76–87% в оседающем детрите поверхностного слоя свидетельствует о слабой продуктивности фитопланктона, доминировании распада Хл-а и косвенно может указывать на преобладание в потоке биогенных частиц, приносимых течением с юго-запада.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ "НИС "Академик Мстислав Келдыш"" в составе ЦКП "Научный флот ИО РАН", <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы признательны команде судна и научному составу за помощь в экспедиции, Е.О. Золотых за аналитические исследования.

Обработка данных профилографов среды выполнена за счет гранта РНФ № 23-77-30001; экспедиционные исследования – в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
2. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. 93-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”: геосистемы западно-арктического шельфа Евразии в сезон активного развития осенне-зимней конвекции и полярной ночи // Океанология. 2024. Т. 64. № 4. С. 731–734.
3. Лукашин В.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
4. Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н. и др. Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в августе 2021 г. // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ИО РАН, 2023. С. 187–191.
5. Водопьянова В.В., Макаревич П.Р. Фотосинтетические пигменты фитопланктона высоких широт в условиях полярной ночи // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/2. С. 249–257.

The first results of the study of particle fluxes in the fall period under conditions of intensive water transport by the West Novaya Zemlya Current at the border of the Barents and Kara Seas based on the materials of two short-term sediment trap deployments.

**Клювиткин А.А.¹, Кравчишина М.Д.¹, Политова Н.В.¹,
Новигатский А.Н.¹, Амбросимов А.К.¹, Булохов А.В.¹,
Иванов В.В.²**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

klyuvitkin@ocean.ru; ²МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,

vladimir.ivanov@aari.ru)

Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в августе 2024 г.

**Klyuvitkin A.A.¹, Kravchishina M.D.¹, Politova N.V.¹,
Novigatsky A.N.¹, Ambrosimov A.K.¹, Bulokhov A.V.¹,
Ivanov V.V.²**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Vertical particle fluxes in the Barents Sea on August, 2024

Ключевые слова: Арктика, седиментационные ловушки, атлантические воды.

Представлены первые результаты исследования потоков осадочного вещества в летний период в желобах-трогах на границах Баренцева моря в условиях взаимодействия атлантической и арктической водных масс по материалам краткосрочной постановки седиментационных ловушек в составе трех автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий.

Исследование рассеянного осадочного вещества необходимо для понимания процессов современного осадконакопления и расшифровки показаний такого природного палеоклиматического самописца, как донные осадки, которые формируются в процессе осаждения и дальнейшего преобразования водной взвеси в осадочную толщу [1]. Потоки вещества в океане — это основная количественная характеристика при изучении осадкообразования, которая позволяет в динамике изучать процессы осаждения частиц, преобразовании их при прохождении водной толщи, оценивать количество и состав вещества, поступающего на дно.

Краткосрочная постановка трех автоматических глубоководных обсерваторий (АГОС) с седиментационными ловушками выполнена (рис. 1) в ходе 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» [2] с целью изучить сезонные потоки и состав оседающего вещества в условиях взаимодействия атлантической и арктической водных масс в желобах-трогах на границах Баренцева моря. Время работы АГОС составила 19.1 (ст. 8005), 17.7 (ст. 8007) и 3.41 (ст. 8042) сут. в интервале времени 30.07–18.08.2024 г.

Для сбора осаждающегося вещества использовались малые седиментационные ловушки МСЛ-110 площадью сбора 0.0095 м² [3]. Пробосборники заполняли фильтратом морской воды из района постановки с соленостью 45 с раствором HgCl₂ (1% от насыщенного раствора) на ст.

8005 и 8007 и без добавления HgCl_2 на ст. 8042. Дальнейшая обработка собранного материала выполнялась по стандартной методике [4]. Для определения параметров среды в составе АГОС были установлены акустические измерители течений Sontek Argonaut MD, CTD-профилографы Daowan DW1613-D и TD-логгеры RBRduet и Daowan DW1413-D.

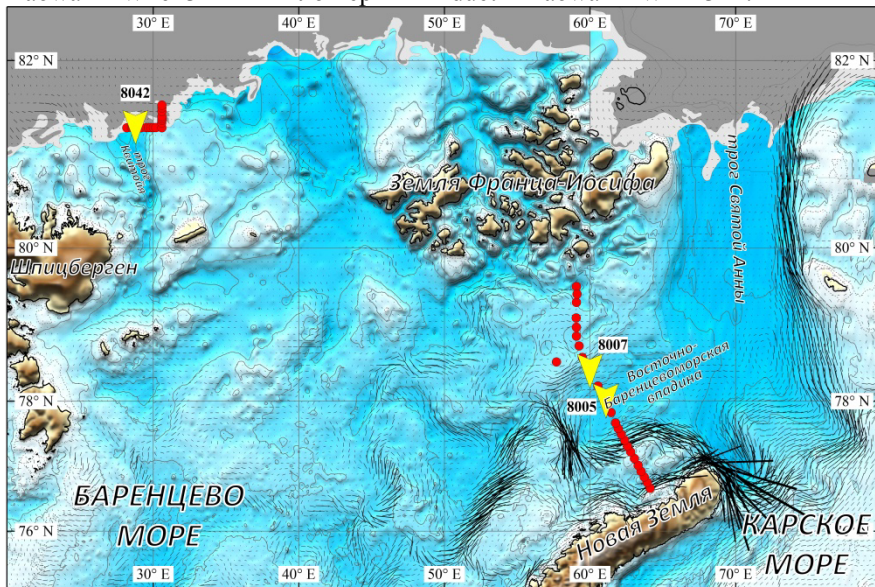


Рис. 1. Карта-схема района исследований с указанием места работы АГОС. Черными штрихами показаны векторы течений [2].

Станции 8005 и 8007 были поставлены в Восточно-Баренцевоморской впадине. Выбор точек постановки обусловлен задачей провести исследования потоков частиц и сопутствующих условий среды в районах, наиболее подверженных влиянию фрамовой ветви атлантической воды (ФАВ). Обе станции приурочены к центральному глубоководному участку гидрологического разреза, где было выявлено ядро ФАВ. Ст. 8005 располагалась в осевой части Восточно-Баренцевоморской впадины примерно на одинаковом расстоянии от берегов Новой Земли и ЗФИ. Ст. 8007 располагалась в 30 м. милях к северо-западу.

Измерение параметров среды выявило смену гидрологической обстановки во второй половине экспозиции станций 8005 и 8007. По всей глубине моря в первой половине срока наблюдалось интенсивное течение в восточном направлении, затем на горизонте 80 м течение резко изменило направление на южное, через некоторое время такое же изменение направления произошло и на горизонте 345 м, при этом у дна таких изменений не выявлено. Эти колебания могли быть вызваны

взаимодействием ФАВ, зашедших в Баренцево море через желоб Св. Анны и ветвями вод Западно-Новоземельского течения. Это нашло свое отражение и в трехкратном увеличении концентрации водной взвеси после подъема ст. 8005, по сравнению с концентрациями перед постановкой (рис. 2). Рост коэффициента обратного рассеяния звука взвесью также подтверждает увеличение содержания взвеси в морской воде, равно как и данные спутникового спектрорадиометра Aqua MODIS.

Ст. 8042 действовала на поперечном разрезе через трог Квитойя. Точка постановки подбиралась так, чтобы попасть в ядро переноса ФАВ по трогу из бассейна Нансена в Баренцево море. Течения на горизонте 73 м, по вертикали соответствующем положению ядра ФАВ, характеризовались постоянным переносом в юго-западном направлении, осложненным только полусуточными приливами. Глубже, на 205 м и у дна (266 м) течения направлены, в целом, на юго-восток, однако носят не столь регулярный характер, такжеотягощены приливным воздействием, а общий перенос в 3.7 и 6.5 раз меньше, чем в ядре ФАВ, соответственно. Изменчивость других параметров среды также носит циклический характер и привязана, в первую очередь, к приливному воздействию.

Потоки вещества были максимальны в Восточно-Баренцевоморской впадине (до $563.5 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ на ст. 8007). При этом даже на относительно небольшом расстоянии (30 м.миль), величины потоков отличались почти в 2 раза (ст. 8005, $318.0 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$). Минимум потоков зафиксирован в трог Квитойя (ст. 8042, $96.8\text{--}98.3 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$).

В составе оседающих частиц преобладало биогенное вещество, в основном, за счет органического вещества (до 91% в подповерхностном слое), а также аномально высокого содержания $\text{SiO}_{2\text{био}}$ (до 53% от суммы основных компонентов потока), обусловленного, очевидно, цветением кремнийконцентрирующих микроводорослей (диатомовых).

CaCO_3 в оседающем веществе Восточно-Баренцевоморской впадины фиксировался в следовых количествах, возрастая до 6% в трог Квитойя.

Потоки хлорофилла также были максимальны в Восточно-Баренцевоморской впадине, что, однако не отмечалось на спутниковых снимках, т.к. наибольшее развитие фитопланктона фиксировалось на подповерхностных горизонтах 30–40 м. Высокое содержание феофитина (75–84%) могло бы свидетельствовать о низком продукционном потенциале фитопланктона и преобладании деструкции над продукцией. Однако в пробах воды из батометров доля феофитина в подповерхностном слое максимума Хл-а составила 20–27%, т.е. сообщество фитопланктона находилось в физиологически активном состоянии, а хлорофилл деградировал уже в ловушках.

Содержание литогенного вещества в подповерхностных горизонтах варьировало от 0.8% в Восточно-Баренцевоморской впадине до 3.6% в трог Квитойя и возрастало с глубиной до 18 и 12% соответственно.

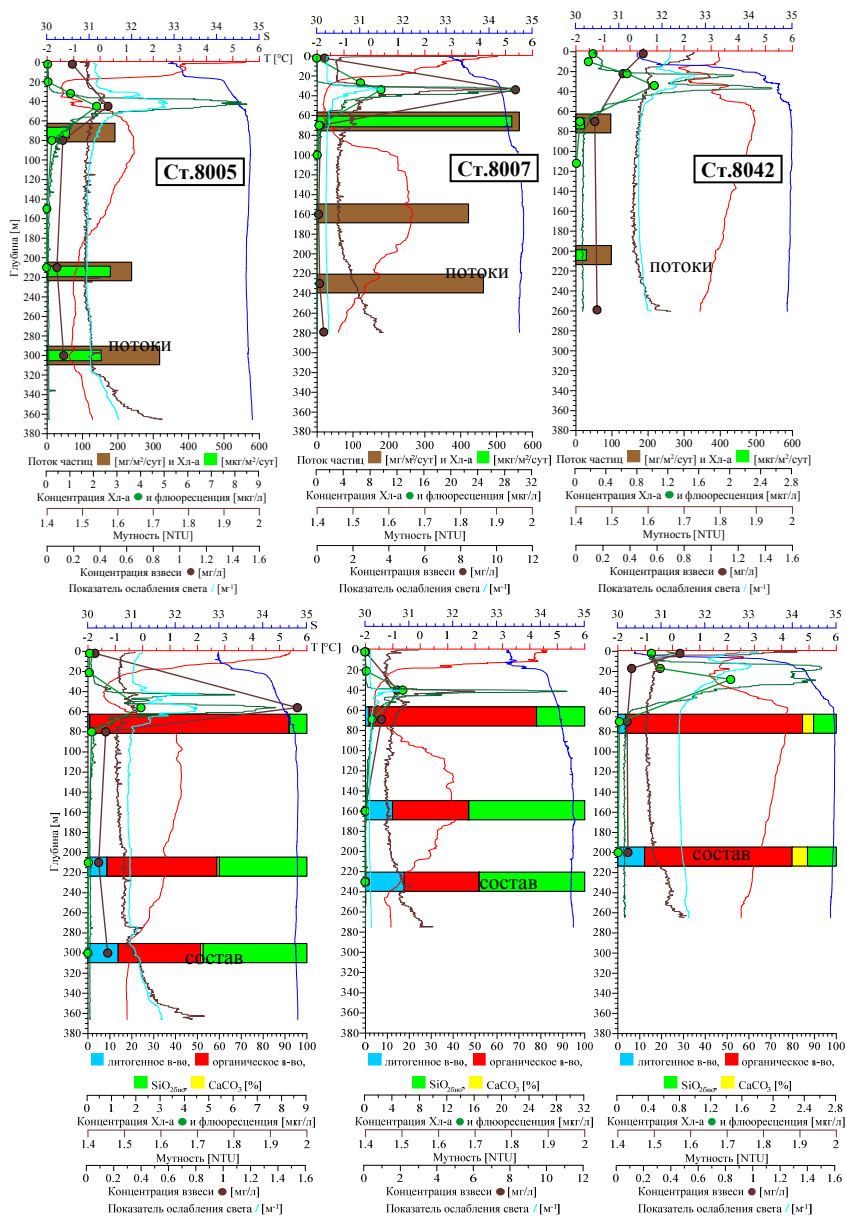


Рис. 2. Потоки вещества и хлорофилла-а, состав вещества, данные СТД-зондирования при постановке и подъеме АГОС.

Таким образом, исследование оседающих частиц на северной и

восточной границах Баренцева моря выявило значительную пространственную, внутрисезонную и межгодовую изменчивость, что определяется, в первую очередь, вкладом биогенного вещества, а в частности, диатомовых водорослей, адвекцией ФАВ, и взаимодействием ФАВ с баренцевоморскими и арктическими водами [4–7].

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ "НИС "Академик Мстислав Келдыш"" в составе ЦКП "Научный флот ИО РАН", <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы признательны команде судна и научному составу за помощь в экспедиции, Е.О. Золотых за аналитические исследования.

Обработка проб осадочного вещества выполнена за счет гранта РНФ № 25-17-00334; экспедиционные исследования – в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
2. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. Апробация системы мониторинга климата на основе заякоренных платформ, обсерваторий и судовых наблюдений в 96-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2025. Т. 65. № 3. С. 524–527.
3. Лукашин В.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
4. Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н. и др. Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в августе 2021 г. // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ИО РАН, 2023. С. 187–191.
5. Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and Dinocyst Production, Composition and Flux from the Annual Cycle Sediment Trap Study in the Barents Sea // Geosciences. 2023. V. 13. № 1. 1.
6. Bodur Y.V., Renaud P.E., Goraguer L. et al. Seasonal patterns of vertical flux in the northwestern Barents Sea under Atlantic Water influence and sea-ice decline // Progress in Oceanography. 2023 V. 219. 103132.
7. Dybwad C., Lalande C., Bodur Y.V. et al. The influence of sea ice cover and Atlantic water advection on annual particle export north of Svalbard // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2022. V. 127. e2022JC018897.

The first results of the study of particle fluxes in the summer period in troughs on the borders of the Barents Sea in the conditions of interaction between the Atlantic and Arctic water masses based on the materials of three short-term sediment trap deployments.

Ковалев Г.А., Амбросимов А.К.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: ambrosimov@ocean.ru)

О проблеме оценки переноса вод по проливам Баренцева моря

Kovalev G.A., Ambrosimov A.K.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

On the problem of assessing water transport through the straits of the Barents Sea

Ключевые слова: Баренцево море; пролив Квитойя; перенос вод; приливно-отливные течения; атлантические воды; стационарные измерения; профили течений; SADCP

В работе проанализированы результаты измерений течений в проливе Квитойя (Баренцево море) с использованием судового SADCP и буйковой станции ПБС-8042. Показано, что величина переноса вод существенно зависит от фазы приливно-отливного цикла: различия между последовательными разрезами достигали 17 раз. Сделан вывод о недостаточности SADCP для полного понимания процессов.

Океанологические разрезы течений играют важнейшую роль при изучении процессов переноса водных масс, тепла, соли, биологических процессов. При этом учет приливных процессов имеет первостепенное значение в задачах оценки климатических изменений в арктическом регионе [2–6, 8]. К примеру, в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2024 г. в проливе Квитойя между Баренцевым морем и Северным Ледовитым океаном было выполнено последовательно два зональных разреза течений: разрез 1 – с запада на восток и разрез 2 – в обратном направлении (рис. 1). Продолжительность первого разреза вместе с проведением 12-ти океанологических станций составила 11 ч, а второго разреза без станций – 6 часов. Расчет объема переноса вод в первом случае составил 0.08 Свердрупа (Св), а во втором 1.35 Св, т.е. разница почти в 17 раз. Оба переноса были осуществлены в северном направлении.

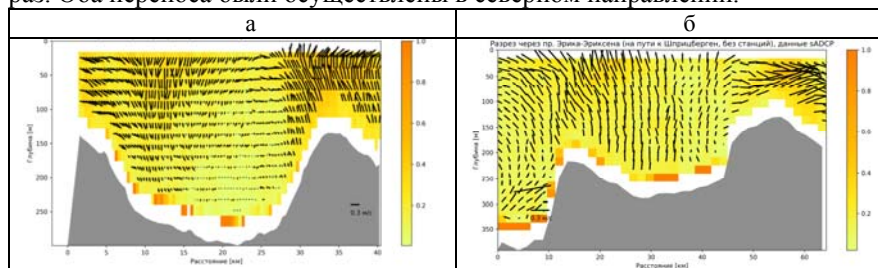


Рис. 1. Разрезы течений 1 и 2 через пролив Квитойя а) Профиль 1; б) Профиль 2. Стрелки – направления скорости, длина стрелки – модуль скорости, а положение стрелки на оси глубин – горизонт наблюдений.

Расчеты показали, что в сумме период прилива и отлива для разреза в проливе Квитойя составляет около 12.25 ч, что соответствует периоду прилива и отлива. Дело в том, что в отличие от солнечного дня, лунный день длится 24 ч 50 мин. Лунный день на 50 мин. длиннее солнечного, потому что Луна движется вокруг Земли в том же направлении, в котором Земля вращается вокруг своей оси. Поэтому Земле требуется дополнительные 50 мин., чтобы «догнать» Луну. Поскольку Земля за один лунный день проходит через две «приливные выпуклости», прибрежные районы испытывают два прилива и два отлива каждые 24 ч 50 мин. Приливы происходят с интервалом в 12 ч 25 мин. Чтобы вода у берега перешла от прилива к отливу или от отлива к приливу, требуется 6 ч 12.5 мин. [1].

Полученные данные по скоростям и направлениям течения по разрезам, не являются мгновенными, а отражают интегральное движение вод через разрез в рамках продолжительности времени проведения разреза, которое, в свою очередь, подвержено динамике 12.25-ти часового приливного периода. За этот период движение вод может попадать на разные фазы прилива и отлива, что необходимо учитывать при анализе измерений. Поэтому для оценки влияния приливных циклов на процесс измерений течений в проливе Квитойя в 96-м рейсе НИС Академик Мстислав Келдыш» [5, 7, 9] на разрезе 2 была установлена притопленная буйковая станция ПБС-8042 с размещенными на ней тремя измерителями течений: Sontek-MD на горизонте 75 м, Sontek-MD на горизонте 210 м и инклинометр на дне на глубине 266 м. Измерения были проведены в период с 12:49 6-го августа по 8:00 10-е августа 2024 г., а их результаты представлены на рисунках 2 и 3. Данные показали, что на протяжении 4-х суток на всех трех горизонтах осуществлялось относительно равномерное циклическое движение вод: на горизонте 75 м в ЮЗ направлении, а на горизонтах 210 м в ЮВ и на дне (266 м) – в ЮВ направлении (рис. 2а).

Анализ векторных (рис. 2б) и прогрессивно-векторных диаграмм скорости и направления течения (рис. 2а), построенных по данным измерений на ПБС-8042, показал, что в течение 12.25-часовых приливно-отливных колебаний течения испытывают круговые движения, наложенные на постоянную составляющую течения, равную 10.9 см/с для горизонта 75 м, 2.8 см/с – для горизонта 210 м и 1.4 см/с – для 266 м (рис. 2а).

Разрезы течений 1 и 2 на рис. 1 показывают, что течение по проливу распределено неравномерно, поэтому сложно ожидать от постановки одной станции объективного результата. Поэтому для получения относительно правдоподобного результата при оценке переноса вод необходимо, чтобы время выполнения измерений на разрезе было кратным приливно-отливному процессу, т.е. 12.25 ч.

На рис. 3б представлен график изменения модуля скорости течения от времени на различных горизонтах на разрезе 1, оценка разности суточных

объемов приливных и отливных вод которых показала, что за цикл в 12.25 ч она практически стремится к нулю. Разница в переносе вод по проливу в 1-ом и 2-ом случаях объясняется разницей во времени нахождения измерений в режимах прилива или отлива.

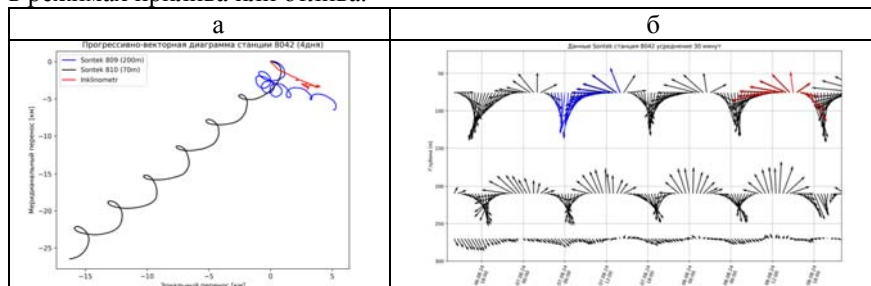


Рис. 2. а) Прогрессивно-векторная диаграмма переноса вод на горизонтах 75, 210 и 266 м; б) скорость и направление течений на горизонтах наблюдений с осреднением 30 мин.

Коррекции профиля течений, полученного с помощью судового SADCP данными измерений, которые были получены со стационарно установленных измерителей течений на ПБС-8042, была проведена с учетом времени нахождения измерений в приливно-отливных циклах движения воды. Период приливного течения в данном районе проявляется в виде фазовых смещений в промежутке времени примерно 12.25 ч (полное время одного приливно-отливного цикла). При анализе отметки времени для каждого профиля были «сдвинуты» на целое число периодов и совмещены с диаграммой стационарных наблюдений (рис. 2б, верхний рис.). Поскольку измерения течений с помощью SADCP и ADCP проводились не одновременно. На рис. 2б синие стрелки – это время проведения профиля 1, покрывшее почти весь временной цикл отлив-прилив. Красные линии – это время проведения профиля 2, которое совпало с пиком прилива и, как видно из стационарных данных (рис. 3б), соответствовало более сильному северному переносу.

Таким образом, различия между переносами в профилях 1 и 2 можно объяснить следующим: приливно-отливной процесс на профиле 1 охватил период отлива и прилива, в результате чего средний перенос оказался слабым и направленным на север (0.08 Св), а измерение течений по профилю 2, наоборот, было проведено во время максимального прилива, когда северный поток усилился и показал перенос в 1.35 Св.

Стационарные наблюдения на ПБС-8042 показали стабильное юго-западное направление течения на верхнем горизонте. Поэтому перенос вод, измеренный в профиле 2, не отражает «реальную» среднюю скорость потока, а лишь временно усиленную фазу прилива.

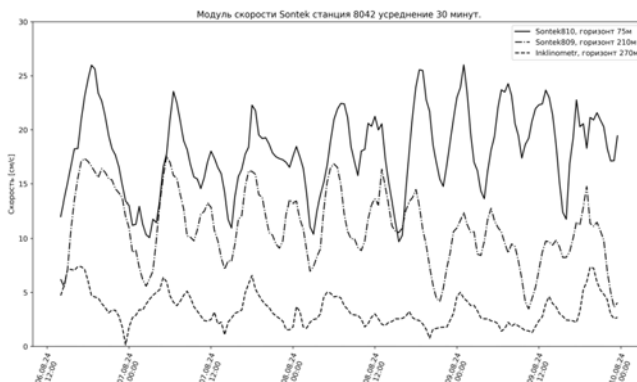


Рис. 3. ПБС-8042 в координатах $81^{\circ}20.015'$ с.ш. $028^{\circ}44.464'$ в.д. а) Изменение модуля скорости течений за время проведения с 13:21 06.08.2024г. по 00:00 10.08.2024 г. мск на различных горизонтах; б) вертикальное распределение CTD-параметров на ст. 8042 в проливе Квитойя

По сути, разница между переносами по разрезам восток-запад и обратно в проливе Квитойя связаны с тем, что в первом случае разрез почти охватывал оба периода и прилив и отлив, а в другом – на пике прилива и в начале отлива, поэтому измерение переноса объемов вод без коррекции к приливному циклу особого смысла не имеет.

Для горизонта 75 м преимущественным направлением было юго-западное течение, а для 200 м – юго-восточное. При этом в зависимости от соотношения между временем проведения разреза к 12 часовому интервалу прилива будет зависеть результирующий объем переноса воды.

Расчеты показали, что географические переносы вод, т.е. по прямой из начальной точки в конечную за 82 ч. 39 мин. наблюдений составили: на горизонте 75 м – 32.3 км, 210 м – 8.2 км и на горизонте 266 м – 4.2 км, а географические скорости – 10.9, 2.8 и 1.4 см/с. При этом полные расстояния, пройденные водой по циклоидам составили – 53.3, 31.0 и 9.7 км, а средние скорости – 17.9, 10.4 и 3.6 см/с соответственно.

Таким образом,

1. Наблюдения показали, что разница в скоростях входа потока АЦПТ в проливы и выхода из них зависит от положения приливного цикла на момент измерений.

2. Различия в переносе вод между профилями 1 и 2 в проливе Квитойя обусловлены приливными течениями: профиль 1 охватил весь цикл отлива–прилива, а профиль 2 – только пик прилива.

3. Без установки долговременной заякоренной станции любые профильные измерения с судового SADCP будут неполноценными и требуют дополнительного контекста, который может предоставить только

стационарные измерения на ПБС.

4. Полученные нами результаты по измерениям переноса вод по разрезам подчеркивают важность комбинированного подхода к морским наблюдениям: профильные сканирования дают пространственную картину, а стационарные измерения позволяют контролировать временные колебания и обеспечивать надежную интерпретацию данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides05_lunarday.html
2. Амбросимов А.К., Ковалев Г.А., Пронина Ю.О. Динамика водных масс в желобе Святой Анны. // Междунар. конф. Инженерная экология. НТО радиотехника, электроника и связь им. А.С.Попова. 2022. Вып. XI. С. 50–55.
3. Амбросимов А.К., Ковалев Г.А. О водообмене между Карским морем и Северным Ледовитым океаном через желоба Святой Анны и Воронина в августе 2024 года // Международный симпозиум «ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ – 2025». РНТОРЭС им. А.С. Попова, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.
4. Ковалев Г.А., Амбросимов А.К. Оценки переноса объемов атлантических вод по океанологическим разрезам Баренцева моря в начале зимнего периода 2023–2024 года // Межд. конф. ПРОБЛЕМЫ ЭКОИНФОРМАТИКИ. РНТОРЭС им. А.С. Попова. РАН. М. 2024. С. 67–70.
5. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. 93-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»: исследование системы «донные осадки – водная толща – приводный слой атмосферы» в сезон активного развития осенне-зимней конвекции на западно-арктическом шельфе Евразии // Океанология. 2024. Т. 64. № 4. С. 731–734.
6. Aksenov Y., Ivanov V.V., Nurser A.J.G. et al. The Arctic Circumpolar Boundary Current // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C09017.
7. Иванов В.В., Тимохов Л.А. Атлантические воды в арктической циркуляционной системе // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 36–53.
8. Nansen F. Northern waters // Captain Roald Amundsen's Oceanographic Observations in the Arctic Seas in 1901. 1906. V. 1. № 3. 145 p.
9. Polyakov I., Pnyushkov A., Alkire M. et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic // Science. 2017. V. 356. P. 285–291.

This study analyzes current measurements in the Kvitoeysa Strait (Barents Sea) obtained using shipborne SADCp and the moored station PBS-8042. The results demonstrate that water transport estimates strongly depend on the tidal phase, with differences between successive transects reaching a factor of 17. The findings highlight the necessity of a combined approach, where spatial profiling is complemented by moored observations to ensure reliable assessment of water exchange in the Arctic.

Колтовская Е.В., Борисенко Г.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: katyayaya15@gmail.com)

Концентрации взвешенного вещества в заливе Шелихова и Пенжинской губе Охотского моря в летний период

Koltovskaia E.V., Borisenko G.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Concentrations of suspended matter in the Shelikhov Bay and Penzhinskaya Bay of the Sea of Okhotsk in summer

Ключевые слова: взвешенное вещество, Охотское море, залив Шелихова, Пенжинская губа

В водах залива Шелихова и Пенжинской губы в летний период 2025 г. изучались концентрации взвешенного вещества. В северо-восточной части залива Шелихова, у входа в Пенжинскую губу, зафиксирована максимальная концентрация взвеси в поверхностном слое — более 62 мг/л. В придонном горизонте высокие значения (9.1–30 мг/л) приурочены к глубоководной части залива Шелихова. Суточная динамика взвеси в устьевой зоне Пенжины показывает, что максимумы концентрации (в начале суток ~0–2 ч и вечером ~14–16 ч) совпадают с фазами прилива и отлива, подтверждая прямую связь с приливной динамикой.

Залив Шелихова и Пенжинская губа — уникальные водные объекты Мирового океана, где наблюдаются одни из самых мощных приливов на планете, достигающих высоты 13 м [1, 2]. Этот регион представляет особый интерес как важнейшее нерестилище для кеты и других промысловых и эндемичных видов рыб, что обуславливает необходимость детального изучения его биогидрохимических характеристик [3, 4]. В свою очередь, взвешенное вещество (ВВ) является важным компонентом биогеохимических циклов, напрямую определяя активность автотрофных и гетеротрофных организмов и формируя пищевую базу для всех трофических уровней [5]. В условиях экстремальных приливов залива Шелихова и Пенжинской губы, ВВ выступает чувствительным индикатором физико-химических процессов, прежде всего — смешения речных и морских вод и интенсивного приливного перемешивания, которые определяют структуру и динамику всей экосистемы.

В тезисах приводятся результаты первичного исследования взвеси — определения ее содержания в пробах для дальнейшего детального изучения биогидрохимической структуры и динамики вод в этом регионе.

Данные были отобраны в рейсе НИС «Академик Опарин» в июле 2025 г. Пробы воды для анализа ВВ отбирались с помощью батометров Нискина, горизонты отбора выбирались на основе данных CTD (Idronaut и SBE319 Plus). Пробы воды фильтровались в судовой лаборатории под вакуумом (400 мбар). В качестве фильтров использовались ядерные мембранные

фильтры с размером пор 0.45 мкм (производства ОИЯИ, Дубна, Россия), предварительно взвешенные и отмытые в соляной кислоте. Концентрация ВВ определялась гравиметрически в лабораторных условиях после высушивания фильтров. Всего было выполнено 23 станции в заливе Шелихова и 4 станции в Пенжинской губе.

Распределение концентрации взвеси в поверхностном слое относительно неоднородное (рис. 1). В южной и центральной частях залива Шелихова концентрации варьируют в диапазоне от 0.72 до 12 мг/л, а максимумы наблюдаются у входа в Пенжинскую губу. Здесь на станции 90 зарегистрирована максимальная концентрация — более 62 мг/л, а высокие значения также отмечаются на станциях 85 и 83.

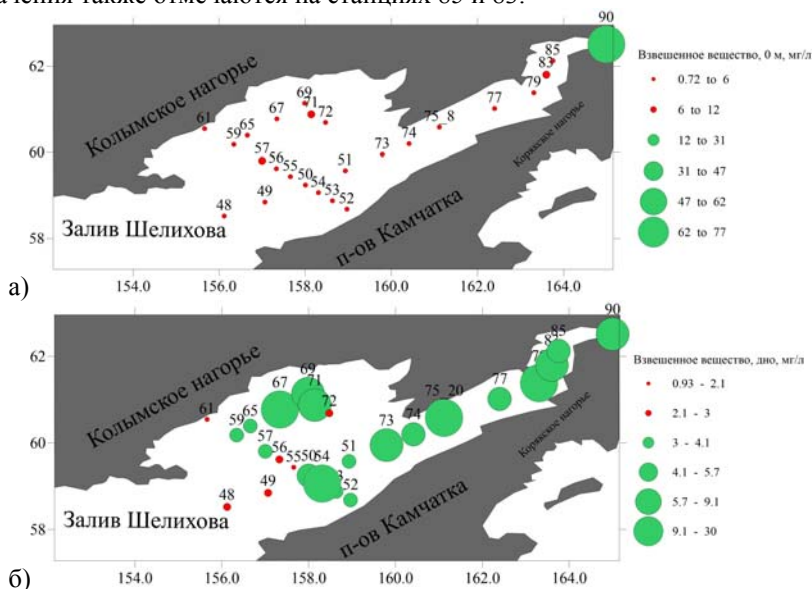


Рис. 1. Распределение концентраций взвешенного вещества в поверхностных (а) и придонных (б) водах.

С удалением от устья р. Пенжина концентрации снижаются, что указывает на влияние речного стока, который является основным источником взвеси. В прошлых исследованиях [1] отмечалось, что максимумы взвеси в нижнем течении р. Пенжины, скорее всего, обусловлены размывом береговых выходов глин на участке реки от порога до устьевового створа. Интенсивность размыва зависит от сильных приливных течений, что находит отражение в распределении ВВ.

Концентрации ВВ в придонном слое в среднем выше, чем в поверхностном. Высокие значения (от 9.1 до 30 мг/л) приурочены к глубоководной котловине центральной части залива, где глубина достигала

260 м. Это район интенсивного приливного апвеллинга, способствующий взмучиванию донных осадков и формирующий при этом зону высокой продуктивности [6, 7]. Экспедиционные данные также указывают на роль антициклонических вихрей (в горле залива Шелихова или над свалом глубин), которые усиливают подъем глубинных вод и транспортировку их в восточную часть залива. При этом турбулентность, вызванная приливной динамикой, может подавлять развитие фитопланктона [6], в результате чего у входа в Пенжинскую губу и на западной оконечности залива значения низкие (менее 3 мг/л). Мелководные участки вдоль берегов залива также характеризуются высокой продуктивностью [7, 8], что отражается в высоких концентрациях взвеси (9.1–30 мг/л).

Ключевой особенностью этих акваторий является суточный тип приливов, что контрастирует с такими известными макроприливыми регионами, как залив Фанди или Мезенская губа, где приливы имеют полусуточный характер [9]. Поэтому в устьевой области р. Пенжина производилась «суточная станция», на которой отбор проб осуществлялся в течение суток с периодичностью в 4 часа.

Согласно натурным наблюдениям за уровнем воды и литературным данным [1, 5], можно отметить, что распределение взвеси в Пенжинской губе является прямым отражением динамики приливных течений (рис. 2). Максимум взвеси наблюдается в начале суток (время ~0–2 ч), что соответствует моменту начала приливной фазы, когда морская вода начинает подниматься и заполнять устьевую часть губы. С ростом уровня воды концентрация взвеси быстро снижается, достигая минимума в середине суток (время ~6–8 ч). Этот минимум совпадает с пиковым уровнем прилива. Концентрация взвеси снова начинает возрастать, достигая второго, более низкого максимума в конце суток (время ~14–16 ч), что связано с началом отливной фазы.

Таким образом, наиболее высокие концентрации ВВ наблюдаются в северо-восточной части залива Шелихова и в устьевой зоне Пенжинской губы, где доминирует влияние речного стока и интенсивные приливные течения. Высокие значения в глубоководной котловине центральной части залива связаны с процессами приливного апвеллинга. Максимум концентрации взвеси в устьевой зоне Пенжины и вдоль берегов являются результатом отливной фазы. Формирование этого распределения невозможно без сильных макроприливных течений, которые обеспечивают постоянную адвекцию терригенного материала в море.

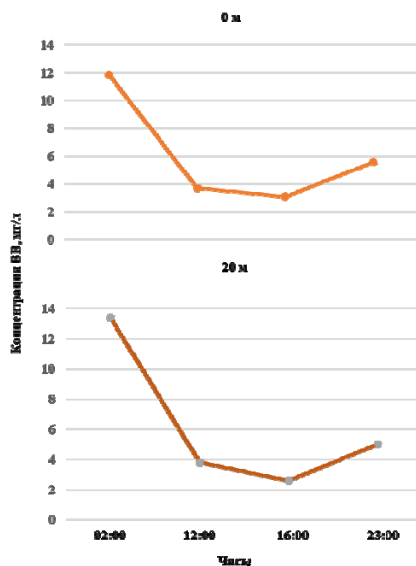


Рис. 2. Изменчивость концентрации взвешенного вещества в течение суток на станции в устьевой области Пенжинской губы.

Авторы признательны начальнику экспедиции П.Ю. Семкину и всему научному составу экспедиции за организацию и проведение рейса. Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИО РАН: FMWE-2024-0020, FMWE-2024-0021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин С.Л. и др. Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2015. № 37. С. 33–52.
2. Shpachuk D.R., Sokolov O.V., Bugaets A.N. Numerical Modeling of Tidal Phenomena of the Penzhinskaya Bay // Океанология. 2023. Т. 63. № 6. С. 886–898.
3. Дубина В.А. и др. Особенности распределения концентрации хлорофилла-а в Охотском море по спутниковым данным // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства. 2021. С. 66–71.
4. Sohrin R. et al. Distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in the western Okhotsk Sea and their effluxes to the North Pacific // Progress in Oceanography. 2014. V. 126. P. 168–179.
5. Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. Органическое вещество,

скорости его трансформации и продуктивность различных районов Охотского моря // Труды ВНИРО. 2016. Т. 164. С. 41–61.

6. Жабин И.А., Ванин Н.С., Дмитриева Е.В. Летний ветровой апвеллинг и приливное перемешивание на западно-камчатском шельфе Охотского моря // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 66–73.

7. Сапожников В.В. и др. Гидрохимические процессы в системе сопряженных мезомасштабных вихрей на шельфе Охотского, Берингова, Белого и Черного морей. Российский фонд фундаментальных исследований, 1996. № 96-05-64575.

8. Шевченко Г.В., Марыжihin В.Е. Приливной апвеллинг на юго-западном шельфе острова Сахалин // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 1. С. 11–24.

9. Каледина А.С., Семкин П.Ю. Структура и динамика вод Пенжинской губы и залива Шелихова в летний период // Сборник конференции «КИМО-2024», Владивосток, 2024.

Suspended matter concentrations were studied in the waters of Shelikhov Bay and Penzhina Bay during the summer of 2025. In the northeastern part of Shelikhov Bay, at the entrance to Penzhina Bay, the maximum suspended matter concentration in the surface layer was recorded—over 62 mg/L. In the bottom layer, high values (9.1–30 mg/L) are confined to the deepwater part of Shelikhov Bay. The diurnal dynamics of suspended matter in the Penzhina estuary zone shows that concentration peaks (early afternoon, ~0:00–2:00 AM, and evening, ~0:00–1:00 PM) coincide with the phases of high and low tide, confirming a direct link with tidal dynamics.

Коробченкова К.Д., Ульянова М.О.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

korobchenkova14@mail.ru)

Распределение взвешенного вещества в устьевой области реки Преголи (Балтийское море)

Korobchenkova K.D., Uyanova M.O.

(Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow)

Distribution of suspended matter in the mouth area of the Pregolya River (Baltic Sea)

Ключевые слова: концентрация взвеси, мутность, смешение вод, устье р. Преголи, Гданьский залив

Рассмотрено распределение взвеси в пространстве и относительно солёности в устьевой области р. Преголя, включающей небольшой участок однорукавного устьевое участка реки, полузакрытое устьевое взморье (Калининградский морской канал, Калининградский залив) и открытое устьевое взморье (прибрежная часть Гданьского залива). Выявлена положительная связь между различными фракциями взвеси и предложено уравнение для приведения к одним единицам измерения. Значения концентрации взвеси и мутности уменьшались от устьевое участка реки к прибрежной части Гданьского залива, за исключением случаев антропогенного влияния. Закономерности между изменением концентрации взвеси и мутности при градиентах солёности не выявлено, так как помимо природных на зону смешения оказывают значительное воздействие антропогенные процессы.

В районе исследования, представленного частью устьевое участка р. Преголи, Калининградским морским каналом (КМК), Калининградским заливом и прибрежной (морской) частью Гданьского залива, происходит смешение речных, заливных и морских вод (рис. 1). Согласно [1], при смешении речных и морских вод в интервале солёности 0–20‰ происходит резкое снижение концентрации взвеси. Зона смешения является глобальным фильтром взвешенного и растворенного вещества, поступающего с суши в море, ее положение зависит от речного стока, ветра и сгонно-нагонных явлений. В районе исследования данные процессы протекают в интервале солёности 1–7 ПЕС, растянутом на несколько десятков километров. На долю р. Преголи приходится 82% общего объема взвешенных веществ, поступающих с общим речным стоком [2]. Целью работы являлось выявление закономерностей количественного распределения различных фракций взвеси в пространстве и сопоставление с градиентными зонами по солёности.

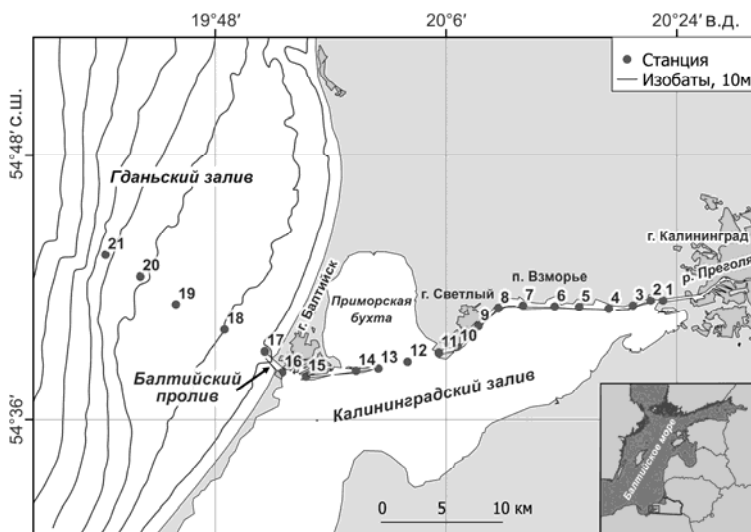


Рис. 1. Карта-схема района исследования.

С 2021 по 2024 гг. было выполнено 7 съемок (19.10.2021, 02.03.2022, 25.05.2022, 12.04.2023, 27.07.2023, 11.11.2023, 25.06.2024), в которых отбирались пробы воды для определения концентрации взвешенного вещества на двух горизонтах (поверхность, дно). Выделение взвешенного вещества из проб воды осуществлялось фильтрационно-вакуумным методом через предварительно взвешенные ядерные фильтры диаметром 47 мм с порами 0,45 мкм. Параллельно пробоотбору проводилось вертикальное измерение мутности оптическими датчиками мутности на зондах Sea&Sun Technology CTD90M (диапазон измерений 0–1250 ЕМФ) и SAIV SD208 (диапазон измерений 0–750 ЕМФ), работающими на основе нефелометрического метода (рассеяние света под углом 90°). Датчик мутности наиболее чувствителен к мелким частицам (0.1–1 мкм). Соленость воды измерялась этими же зондами.

Статистический анализ данных, который выполнялся для пересчета мутности в расчетную концентрацию взвеси, показал положительную связь. Коэффициент корреляции изменялся в диапазоне от 0.61 (19.10.2021) до 0.97 (02.03.2022). Выявлено, что для пересчета наиболее подходящим является экспоненциальное уравнение регрессии для данных без учета выбросов, которые составили 1% от общего количества данных, коэффициент корреляции составил 0.72 (рис. 2). Уравнение можно применять при отсутствии данных о концентрации взвеси. Если данные доступны, то рекомендуется подбирать регрессионную модель и коэффициенты для каждой съемки, так как фракции взвеси и влияющие на

район исследования факторы отличаются. Приведение к одним единицам измерения позволяет оценить соответствие с нормативами, установленными для загрязняющих веществ (ПДК), к которым относится взвесь. Также косвенный метод пересчета позволяет подробнее рассмотреть пространственное распределение взвеси, рассчитанной из мутности, так как у значений будет выше дискретность.

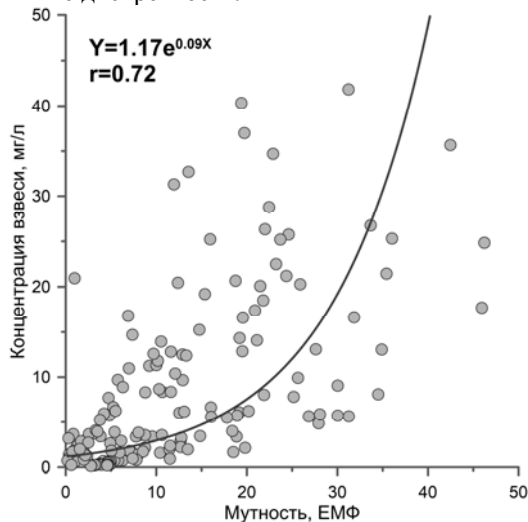


Рис. 2. Зависимость между значениями концентрации взвеси и мутности.

Пространственное распределение концентрации взвеси и мутности показало, что для периода половодья (02.03.2022) были характерны пики значений в районе устья реки (ст. 1, см. рис. 1). Расход воды р. Преголи на гидрологическом посту г. Гвардейск (56 км от устья) в дату съемки составлял 265 м³/с, при среднем расходе воды 55 м³/с за период 2020–2023 гг. [3], преобладала терригенная взвесь. Для съемок 12.04.2023 и 25.05.2022 были характерны пики значений взвеси и мутности в устье реки и в районе станций (ст. 7–10, см. рис. 1), находящихся рядом с гаванью нескольких крупных предприятий и дамбы отвала грунта при дноуглублении. Расход речной воды уменьшился (12.04.2023 – 72 м³/с, 25.05.2022 – 24 м³/с) и в то же время отмечались периоды весенне-летнего развития планктона и увеличение доли биогенной взвеси в общем объеме взвешенных веществ. Летом в период межени пик значений в устье реки отсутствовал (27.07.2023 – 19 м³/с). Максимальные значения концентрации взвеси и мутности наблюдались в районе ст. 7) см. рис. 1), где, вероятно, из-за недостаточной глубины гавани при швартовке загруженные суда касаются дна и происходит взмучивание. В июне 2024 г. наблюдался абсолютный максимум значений (86 мг/л, 66 ЕМФ). В эту же дату в канале локально

(между г. Светлый и пос. Взморье) производились дноуглубительные работы, которые тоже могли внести свой вклад в концентрацию взвеси в воде. В период осенней межени (19.10.2021 – 48 м³/с, 11.11.2023 – 21 м³/с) отсутствовали пики концентрации взвеси и мутности в устье реки. Придонный слой характеризовался несколько более высоким содержанием взвеси и мутности, что может быть связано с преобладающими погодными условиями, приводящими к взмучиванию донных отложений и преобладанию доли терригенной взвеси из-за процессов перемешивания и стгонно-нагонных явлений.

Динамика распределения концентрации взвеси и мутности, в целом, совпадала. Различие между положением максимумов и минимумов весовой взвеси и мутности объясняется фракцией взвеси и чувствительности каждого метода к разному размеру частиц.

Сравнение пространственного распределения расчетной концентрации взвеси и солёности позволило выделить несколько характерных случаев соотношения градиентных зон рассматриваемых параметров:

- градиентные зоны совпадали полностью в период половодья (02.03.2022), когда влияние речного стока четко отслеживалось по профилям распределения и взвеси, и солёности;
- совпадение градиентных зон только в районе Балтийского пролива (ст. 17, рис. 1) при смешении заливных и морских вод (27.07.2023, 19.10.2021);
- градиентные зоны по солёности не совпадали с градиентными зонами по взвеси, образовавшимися при значительном антропогенном воздействии (25.06.2024, 11.11.2023);
- градиентные зоны не совпадали при отсутствии заметного антропогенного влияния (12.04.2023, 25.05.2022).

Высокие концентрации взвеси (около 25 мг/л) наблюдались в устьевом участке во время/после половодья (преобладание терригенной взвеси). Позже, в период интенсивного «цветения» концентрации снижались (до 10 мг/л). Коэффициент корреляции между весовой взвесью и мутностью не зависел от сезона года (половодье, межень) – высокая сходимость результатов, полученных разными методами, наблюдалась как в холодный период года, так и в теплый. Полученное общее уравнение пересчета мутности в концентрацию взвеси может быть использовано для балансовых расчетов поступления взвешенного вещества из залива в море (например, при изучении плюмов). Закономерность резкого снижения концентрации взвеси и мутности при градиентах солёности тоже не выявлена, так как район исследования подвержен влиянию не только природных (сгонно-нагонные процессы, ветровое перемешивание, увеличение расхода реки, «цветение» фитопланктона), но и антропогенных процессов (прохождение судов, дноуглубление).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки

России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Авторы благодарны за помощь в получении и обработке данных – Бубновой Е.С. и Кречиху В.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
2. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Лазаренко Н.Н., Маевского А.Л. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 279 с.
3. Центр океанографических данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД. 1999. URL: <http://portal.esimo.ru/portal/> (дата обращения: 12.05.2025)

The study examines the spatial distribution of suspended matter and salinity in the mouth area of the Pregolya River, which includes a small section of the single-branch mouth section of the river, a semi-closed mouth area (the Kaliningrad Sea Canal, the Kaliningrad Lagoon), and an open mouth area (the coastal part of the Gulf of Gdansk). A positive relationship was found between different fractions of suspended matter, and an equation was proposed for reducing them to the same units of measurement. The values of suspended matter concentration and turbidity decreased from the mouth section of the river to the coastal part of the Gulf of Gdansk, except for cases of anthropogenic influence. No patterns were found between changes in suspended matter concentration and turbidity with salinity gradients, since in addition to natural processes, anthropogenic processes have a significant impact on the mixing zone.

**Котова Е.И.¹, Стародымова Д.П.¹, Лохов А.С.¹,
Нецветаетаева О.П.¹, Титова К.В.²**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

kotova.ei@ocean.ru; ²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск)

**Исследования взаимосвязи химического состава снежного
покрова и поверхностных вод в эстуариях рек юго-
восточной части Баренцева моря**

**Kotova E.I.¹, Starodymova D.P.¹, Lokhov A.S.¹,
Netsvetaeva O.P.¹, Titova K.V.²**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch RAS, Arkhangelsk)

**Research on the relationship between the chemical composition
of snow cover and surface waters in the river estuaries of the
southeastern part of the Barents Sea**

Ключевые слова: снег, эстуарий, Индига, Печора, Пеша, биогены, металлы.

Изучался состав снежного покрова, льда и поверхностных вод в устьях рек Индига, Пеша и Печора. Состав снежного покрова в дельтах рек юго-восточного побережья Баренцева моря формируется в результате комплексного взаимодействия воздушной и водной среды. Данный процесс характеризуется сложными физико-химическими механизмами, определяющими качественный состав снежных отложений.

Исследование взаимосвязи химического состава снежного покрова и поверхностных вод представляет собой актуальную научную задачу, имеющую большое значение для понимания условий и процессов функционирования экосистем устьевых областей рек. Традиционно снежный покров рассматривается, как интегральный накопитель примесей из атмосферы [1], которые при весеннем снеготаянии высвобождаются в окружающую среду, в том числе в поверхностные водные объекты [2]. Но снежный покров устьевых областей рек юго-востока Баренцева моря имеет уникальный состав, который формируется в условиях тесного взаимодействия как с воздушной, так и с водной средой [3]. В данной работе рассматривается взаимовлияние состава снежного покрова и поверхностных вод эстуариев рек *Индига*, *Пеша* и *Печора* бассейна Печорского моря.

Материалы и методы. Экспедиционные исследования проводились в марте 2025 г. в эстуариях рек *Индига*, *Пеша* и *Печора*. Отбор проб проводился в период максимального снегонакопления. Одновременно отбирались пробы снега, льда и устьевой воды. Снег собирали в пластиковую тару с помощью пластикового пробоотборника на всю

глубину залегания. Керна льда отбирались титановым буром, проба устьевой воды – батометром. В пробах определялся уровень pH и минерализация, содержание биогенных веществ (кремниеслоты, общих форм фосфора и азота), растворимых форм металлов и металлоидов.

Отбор проб в эстуарии *р. Индига* проводился в 5 точках. Точка 0 расположена на морской границе. Точка 1 – примерно посередине между поселком и морской границей. В этой точке впервые в марте 2023 г. было определено влияние морских вод на характеристики снежного покрова [3]. Точка 2 расположена у поселка Индига, точка 3 – в вершине эстуария. В точках 0–3 отбор проб осуществлялся со льда. Точки 4 и 5 расположены по берегам *р. Индига* поблизости от точки 1. Отбор проб в данных точках осуществлялся с суши. В точках 1 и 2 отбор проб осуществлялся в период отлива и прилива, одновременно с отбором проб снега отбирались керны льда и воды.

В устье *р. Пеша* отбор осуществлялся в 3 точках: на границе эстуария и моря, в середине устьевой области, в 30 км от устья. В средней точке здесь также в 2023 г. выявлено влияние морских вод на характеристики снежного покрова. В 2025 г. в точке 2 одновременно с отбором пробы снега была отобрана проба воды в р. Пеша.

В дельте *р. Печора* отобрано 4 пробы, 2 из которых расположены на границе эстуария и моря. Влияние морских вод в дельте Печоры ранее было не установлено, хотя выход воды на лед наблюдался. Но, видимо, здесь происходил «смыв снега» при выходе воды на лед.

Уровень pH. В устье *р. Индига* уровень pH снега изменялся в диапазоне от 4.3–4.5 в пробах, отобранных с поверхности суши до 6.3–7.8 в пробах, отобранных со льда. Значения pH льда составляли 6.9–7.5. При этом в верхней части льда значения pH были ниже на 0.3–0.4 ед. pH. В точке, расположенной ближе к морю, в период отлива значения pH снижались на 0.2–0.3 ед., а точке у поселка – на 0.5 ед. Приливо-отливные колебания сказывались и на характеристиках снега, уровень pH которого в период отлива снижался на 0.5–0.6 ед. Уровень pH воды в устьевой части *р. Индига* составил 7.7–7.8.

В устье *р. Пеша* и в дельте *р. Печора* pH снежного покрова увеличивался от 4.5 до 6.0–6.3 при продвижении к устьевому взморью. Уровень pH воды в эстуариях данных рек определен на уровне 7.4.

Минерализация. По значению минерализации пробы снежного покрова, отобранные в районе эстуария *р. Индига*, можно разделить на 2 группы: подверженные влиянию устьевых вод и атмосферного аэрозоля (минерализация 610–1973 мг/л) и подверженные влиянию атмосферного аэрозоля (минерализация 32–262 мг/л). При этом следует отметить, что в период отлива в точках, подверженных влиянию речных вод, минерализация снежного покрова снижалась почти в 1.5 раза. Во вторую группу были отнесены точки, отбор проб на которых проводился с суши,

одна из которых расположена на морской границе. Минерализация льда в малую воду составляла 1509–1580 мг/л в верхнем слое, 3670–3980 мг/л – в нижнем слое, в полную воду: 3208–3350 мг/л и 4520–4640 мг/л в верхнем и нижнем слоях соответственно. При этом большой разницы между характеристиками снега и льда в точках 1 и 2 не выявлено. Минерализация воды эстуария *р. Индига* изменялась в диапазоне 22500–32700 мг/л.

Минерализация снежного покрова в средней части эстуария *р. Пеша* составила 958 мг/л на фоне значений 16–18 мг/л в двух других точках. Минерализация речной воды в этой точке доходила до 22800 мг/л, а в удаленной от моря точке минерализация воды уже равнялась 264 мг/л.

В дельте *р. Печора* увеличение минерализации снежного покрова до 16–28 мг/л отмечено на морской границе. На удалении от моря минерализация снежного покрова составляла уже 8 мг/л. Минерализация воды *р. Печора* находилась на уровне 191 мг/л.

Биогенные вещества. На содержание растворимых форм кремния в снежном покрове эстуария *р. Индига* существенное влияние оказывает просачивание устьевых вод. В пробах снежного покрова, отобранных в период прилива, концентрация кремния достигала значений 99.1 мкгSi/л. В период отлива концентрации кремния в снеге снижались до 24.5 мкгSi/л. В пробах, отобранных на морской границе, а также в точках, расположенных на суше, содержание данного элемента находилось на уровне 3.9–5.2 мкгSi/л. Концентрации кремния во льду изменялись в диапазоне 65.6–170.0 мкгSi/л в верхнем слое, 128.7–281.2 мкгSi/л – в нижнем слое. В воде реки концентрации кремния составили 1117–1962 мкгSi/л. В тоже время проникновение устьевых вод в снежный покров приводит к снижению содержания растворимых форм азота. В период малой воды значения составили 703–810 мкгN/л. В период полной воды концентрации общего азота в снеге находились на уровне 347–388 мкгN/л. На таком же уровне его содержание было на морской границе эстуария – 397 мкгN/л, а также во льду: 190–438 мкгN/л. В воде *р. Индига* концентрации общего азота были невысокими: 132–289 мкгN/л. Наибольшее содержание общего азота определено в точках, отобранных на суше: 744–1150 мкгN/л. Наименьшее содержание общего фосфора в снеге (4.9 мкгP/л) определено на морской границе эстуария. В остальных пробах снега концентрации общего фосфора изменялись в диапазоне 5.6–8.7 мкгP/л. Во льду содержание фосфора было несколько выше: 11.1–46.4 мкгP/л. В речных водах содержание общего фосфора увеличивалось с 16.6 мкгP/л до 34.7 мкгP/л при увеличении доли речного стока (в период малой воды на дальней точке).

Поступление растворимых форм кремния в снежный покров эстуария *р. Пеша* происходит при проникновении морской воды: в точке 2 его содержание в снеге максимально (57.9 мкгSi/л). Морской аэрозоль также увеличивает содержание растворимых форм кремния: его концентрация в снежном покрове на морской границе (11.6 мкгSi/л) в 4.5 раза выше, чем в

самой удаленной точке. Влияние поверхностных речных вод на содержание фосфора и азота в снежном покрове устья р. Пеша не прослеживается. Скорее здесь имеет место воздействие морского аэрозоля. Максимальные концентрации общих форм фосфора (9.4 мкгР/л) и азота (612 мкгN/л) определены на морской границе эстуария. Следует отметить, что содержание общего фосфора в снежном покрове не намного ниже его содержания в речной воде (10.4–14.9 мкгР/л), а содержание общего азота в снеге (380–612 мкгN/л) даже превышает его содержание в речных водах (116–124 мкгN/л).

Пространственное распределение содержания общего фосфора и общего азота в снежном покрове дельты р. *Печора* примерно равномерное. Концентрации общего фосфора составили 4.5–6.6 мкгР/л, общего азота – 289–380 мкгN/л. Вблизи морской границы р. Печора отмечается рост содержания в снежном покрове растворимого кремния до 45.0 мкгSi/л.

Растворенные микроэлементы. Морские воды, поступающие в период прилива в устье р. *Инди́га* содержат повышенные концентрации лития и ванадия. Проникая в снег, они способствуют увеличению содержания этих микроэлементов и в снежной толще в 1.6–1.8 раза. При этом следует отметить, что концентрации ванадия превышают предельно допустимое значения для водных объектов рыбохозяйственного значения в 6–11 раз. В районе поселка Инди́га отмечается увеличение концентраций в снеге растворимых форм хрома, никеля, марганца и мышьяка. Вместе с тем содержание никеля во льду примерно на том же уровне, что и в снеге, а его концентрации в воде реки Инди́га не зависят от фазы прилива. Содержание растворимых форм цинка (1.2–1.8 мкг/л) и свинца (0.3–0.4 мкг/л) в пробах, отобранных на суше, выше в 3–4 раза и достигают, а некоторых случаях даже превышают значения, полученные для льда и речной воды. Особенно это касается свинца, содержание которого во льду было ниже предела обнаружения.

В средней части р. *Пеша*, где отмечено влияние морских высокоминерализованных вод на состав снежного покрова, наблюдается увеличение в снежном покрове растворимых форм лития, алюминия, ванадия, хрома, кобальта, никеля, меди, мышьяка, молибдена, стронция, кадмия. Концентрации этих же микроэлементов значительно выше в пробе воды, отобранной в центральной части устья, в сравнении с пробой воды, отобранной в вершине эстуария. Наряду с этим содержание растворимых форм цинка и свинца увеличивается от побережья к вершине эстуария, а их концентрации выше, чем в речной воде (содержание растворимых форм свинца в воде р. *Пеша* были ниже предела обнаружения). Содержание марганца в снежном покрове в точках, расположенных ближе к морю, было на уровне 5.1–5.8 мкг/л, в удаленной от моря точке концентрация составила 0.5 мкг/л.

В снежном покрове дельты р. *Печора* отмечено увеличение содержания

на морской границе растворимых форм лития, марганца, кобальта и стронция, поступающих в составе морского аэрозоля. Концентрации ванадия, цинка, кадмия и свинца примерно на одном уровне на всем протяжении дельты, при этом практически соответствуют содержанию этих микроэлементов в речной воде. Содержание растворимых форм свинца в воде р. Печора также были ниже предела обнаружения.

Авторы признательны ТК «Еду в НАО» за помощь в проведении экспедиционных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 22-77-10074 (экспедиционные исследования), в рамках темы НИР № FMWE-2024-0020 (анализ проб, интерпретация результатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.П., Алиев Р.А., Бобров В.А. и др. Эоловый материал в природных архивах // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир. 2012. С. 70–107.
2. Starodymova D.P., Kotova E.I., Shevchenko V.P. et al. Winter atmospheric deposition of trace elements in the Arkhangelsk region (NW Russia): Insights into environmental effects // Atmospheric Pollution Research. 2024. V. 15. № 12. P. 102310. DOI 10.1016/j.apr.2024.102310.
3. Котова Е.И., Нецветева О.П., Новикова Ю.В., Титова К.В. Физико-химические характеристики и альгологический состав снежного покрова в устьях рек бассейна юго-восточной части Баренцева моря // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 1(53). С. 127–134. DOI 10.25283/2223-4594-2024-1-127-134.

The composition of snow cover in the estuaries of the Indiga, Pesha, and Pechora rivers was formed as a result of the complex interaction of the air and water environment. This process is characterized by complex physico-chemical mechanisms that determine the qualitative composition of snow deposits.

Митяев М.В., Герасимова М.В.

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, e-mail: mityaev@mmbi.info)

Современная литодинамика в салме Гавриловских островов и губе Подпахта Баренцева моря

Mityaev M.V., Gerasimova M.V.

(Federal state budgetary establishment of a science Murmansk marine biological institute RAS, Murmansk)

Modern lithodynamics in the salma of the Gavrilovsky Islands and the Podpakhta Bay of the Barents Sea

Ключевые слова: взвешенное вещество (ВВ), вертикальный поток вещества, латеральный поток вещества, салма Гавриловских островов, губа Подпахта

В летний сезон 2024 г. на Мурманском побережье стояла теплая, сухая, слабоветренная погода (на 3–4°C выше нормы, менее 50% суммы атмосферных осадков), но толщина морской воды не прогревалась, и более высокие температуры наблюдались только в придонном горизонте. В этих условиях валовой запас осадочного вещества в толще воды в среднем составлял $12.2 \pm 0.3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, при снижении значений от июля 2024 г. к сентябрю. В вертикальном потоке участвовало менее 5% осадочного вещества, находящегося в толще воды во взвешенном состоянии, на дно губы за месяц отлагалось 3.5–4 т вещества. В латеральном потоке участвовало менее 8% осадочного вещества, находящегося в толще воды во взвешенном состоянии, из которых 2% ежедневно выносилось в открытую акваторию моря. За месяц из губы выносилось 11–12 т вещества, что втрое больше, чем аккумулировалось на дне. Таким образом, на дно губы в месяц поступает порядка $14\text{--}15 \cdot 10^5$ Ккал, в то время как выносится порядка $50\text{--}55 \cdot 10^5$ Ккал.

Исследование содержания, пространственно-временных изменений концентрации и состава рассеянного в воде океанов и морей вещества весьма многочисленны, но до сих пор не потеряли своей актуальности. Мониторингу наиболее сложноустроенного верхнего «деятельного слоя» морской воды посвящено большое количество исследований как отечественных, так и иностранных ученых, так как для экологии всех водоемов необходимо выявление путей миграции взвешенного вещества (разнонаправленные потоки ВВ) и его объемы.

Следовательно, в условиях быстро меняющейся окружающей среды и климата важнейшая задача исследования береговой зоны – мониторинг потоков ВВ и энергии в толще воды, так как основная масса нерастворенного в морской воде вещества перемещается во взвешенном состоянии. Цель исследования состояла в определении количества ВВ, как в *in situ*, так и в потоках. Стратегия работы заключалась в продольном пересечении салмы, контролирующей потоки вещества, направленные как в открытую акваторию Баренцева моря, так и вдоль побережья с целью

последующего определения расходов вещества в потоках.

Исследования проводились в салме Гавриловских островов и губе Подпахта Баренцева моря, на территории Кандалакшского государственного заповедника с 1 июля 2024 г. по 15 сентября 2024 г.

Отбор проб, постановка/снятие седиментационных приборов и наблюдения в водной толще производились с борта резиновой лодки (Корсар-450) традиционными апробированными методами. Обработка проб детально описана в работе Митяева М.В. [1].

В период работ стояла теплая погода (средняя температура $+13.9 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, $n=72$) почти на 3.0°C выше чем среднемноголетняя температура воздуха в районе работ [1]. В июле 2024 г. среднемесячная температура воздуха составляла $+13.5 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$, среднесуточный градиент температур $+6.0 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$. В августе 2024 г. – $+14.4 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$, среднесуточный градиент температур $+5.7 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. В летние месяцы наиболее теплая погода устанавливалась к третьей декаде. В первой половине сентября сохранялась теплая погода – средняя температура $+12^{\circ}\text{C}$, что отвечает «бабьему» лету.

За период работ атмосферных осадков выпадало мало, в июле 28.3 мм (меньше $\frac{1}{2}$ месячной нормы), в августе всего 5.5 мм. В первой половине сентября меньше 10 мм, что очень мало для этого сезона года.

Средняя скорость ветра составляла 5.2 ± 0.3 м/с, наблюдалось увеличение средней скорости ветра от июля к сентябрю. В июле средняя скорость ветра 4.9 ± 0.4 м/с, при единичном шторме (средняя скоростью ветра >10 м/с) и 2 ветреных периодах (в середине и конце месяца, скорость ветра 7–8 м/с). Продолжительный штиль установился в третьей декаде месяца длительностью 5 сут. (скорость ветра 2.7 ± 0.4 м/с). Резко преобладали ветра восточных румбов (С-В и В), ветра западных румбов (Ю-З и С-З) дули реже, ветров северных и южных направлений практически не было. В августе средняя скорость ветра 5.6 ± 0.6 м/с, при шестидневном шторме (скорость ветра 10.7 ± 1.3 м/с, в порывах до 30 м/с). Продолжительный штиль установился в начале месяца и длился 19 суток (скорость ветра 3.8 ± 0.2 м/с). Преобладали сгонные и вдольбереговые ветра западных румбов (С-З и Ю-З), ветра восточных румбов (В, Ю-В и С-В) дули реже. В первой половине сентября сохранялась высокая скорость ветра в среднем >7 м/с, но штормов не было. Резко преобладали сгонные Ю-З ветра (около 80% времени).

Среднемесячное давление воздуха практически не менялось и соответствовало нормальному атмосферному давлению для данного района Мурманского берега [1]. В июле атмосферное давление было – 752.4 ± 1.7 , в августе – 752.3 ± 1.9 , в сентябре – 758.5 ± 3.5 мм рт. ст.

Таким образом, в период работ стояла теплая, сухая, слабоветренная погода. Если температурные показатели 2024 г. сильно превышают среднемноголетний диапазон температур на данном участке Мурманского берега, то скорость ветра и его направление очень близки к многолетним

показателям. Так же сильно, как и температурные показатели, отличается количество выпавших атмосферных осадков [1].

Океанографические характеристики водной толщи в июле–сентябре 2024 г. сильно отличаются от среднемноголетних показателей в районе работ [1]. В июле 2024 г. температура поверхностного слоя в среднем $7.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$, придонного – $5.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$. В августе 2024 г. поверхностный слой – $9.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$, придонный – $8.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$. В сентябре 2024 г. поверхностный слой – $11.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$, придонный – $11.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Таким образом, с июля по сентябрь 2024 г. происходил постепенный прогрев водной толщи, с выравниванием температур в поверхностном и придонном горизонтах. Скорость прогрева в поверхностном слое составляла 0.06°C в сутки, в придонном горизонте – 0.10°C в сутки, к середине августа это привело к тому, что водная толща стала однородной (градиент температур между поверхностным и придонным горизонтом уменьшался с 2.6°C в июле до 0.5°C в сентябре).

Интересно, что при отсутствии атмосферных осадков, соленость морской воды была понижена. В июле 2024 г. соленость поверхностного слоя в среднем $26.812 \pm 2.264\%$, придонного – $27.352 \pm 2.536\%$. В августе 2024 г. соленость поверхностного слоя – $28.629 \pm 2.224\%$, придонного – $29.175 \pm 2.306\%$. В сентябре 2024 г. соленость поверхностного слоя – $28.391 \pm 1.114\%$, придонного – $29.465 \pm 2.218\%$

Концентрация ВВ в июле–сентябре 2024 г. в салме Гавриловских островов и губе Подпахта изменялась от 0.41 до 1.19 мг/л, в среднем составляя 0.67 ± 0.02 мг/л. В поверхностном слое морской воды концентрация ВВ изменялась от 0.41 до 0.77 мг/л, в среднем 0.59 ± 0.02 мг/л. От июля к сентябрю 2024 г. концентрация ВВ в поверхностном слое воды снижалась. В июле 2024 г. средняя концентрация ВВ 0.65 ± 0.04 мг/л, в августе – 0.57 ± 0.03 мг/л, в сентябре – 0.54 ± 0.04 мг/л. В придонном горизонте концентрация ВВ изменялась от 0.52 до 1.19 мг/л, в среднем 0.75 ± 0.03 мг/л (концентрация ВВ >1 мг/л является аномальной, выявлена один раз и поэтому исключена из расчета среднего математического ожидания количества ВВ). Средняя концентрация ВВ в придонном слое снижалась от июля к сентябрю 2024 г. В июле 2024 г. концентрация ВВ 0.80 ± 0.04 мг/л, в августе – 0.76 ± 0.02 мг/л, в сентябре – 0.69 ± 0.05 мг/л.

В целом, никакой зависимости в изменении концентрации ВВ на горизонтах водной толщи вдоль салмы Гавриловских островов не наблюдается, в отличие от запаса осадочного вещества в толще воды.

Валовой запас (ВЗ) ВВ над одним квадратным метром дна изменялся от 9.2 до 16.1 грамма ($\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$), в среднем составляя 12.2 ± 0.3 $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$. Запас ВВ уменьшался от июля к сентябрю 2024 г. В июле 2024 г. ВЗ в среднем составлял 13.3 ± 0.7 , в августе – 12.3 ± 0.2 , в сентябре – 11.3 ± 0.6 $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$. Четко прослеживается закономерность – вдоль салмы ВЗ увеличивается с запада на восток. Несомненно, это связано с действием постоянного вдольберегового течения, направленного с запада на восток вдоль салмы.

Ширина салмы у о. Мал. Гусенцы резко сужается, уменьшая объем водной массы выносимой в губу Ярнышная. Это приводит к накоплению ВВ в толще воды у островов, в результате непрерывной поставки ВВ вдольбереговым течением. Особенно большое накопление осадочного вещества в толще воды происходит у островов Бол. и Мал. Гусенцы.

Вертикальный поток ВВ в восточном борту губы Подпахта изменялся от 350 до 458 мг на квадратный метр в сутки ($\text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), в западном борту губы – от 420 до 763 $\text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Каких либо закономерных изменений значений вертикального потока во времени не наблюдалось, но значения вертикального потока ВВ увеличиваются от отлива к приливу. В вертикальном потоке участвует менее 5% от запаса ВВ, находящегося в толще воды, в прилив – 4.2%, в отлив 1.9%. Следовательно, более 95% ВВ не участвует в осадконакоплении, а мигрирует в латеральном направлении. Несмотря на это на дно губы в месяц отлагалось от 3.5 до 4 тонн ВВ.

В целом латеральный поток ВВ в губе Подпахта направлен в салму Гавриловских о-вов. В восточном борту губы латеральный поток изменялся от 53.236 до 64.442 $\text{г} \cdot \text{сут}^{-1}$, через сечение в один метр от поверхности воды до дна (глубина моря 14 м). В западном борту губы – от 62.316 до 75.667 $\text{г} \cdot \text{сут}^{-1}$ (глубина моря 14 м). Всегда в отлив в салму выносятся больше ВВ, чем приносится в прилив. В латеральном потоке участвует менее 8% запаса ВВ (в прилив – 5.9%, в отлив 7.9%). При этом, около 2% ВВ ежедневно выносятся из акватории губы в салму. В среднем за месяц из губы выносятся 11–12 т ВВ, что втрое больше чем аккумулируется на дне губы.

Таким образом, энергетический баланс можно охарактеризовать следующим образом: на дно губы в месяц поступает порядка 1–1.5·млн. Ккал, а выносятся в салму порядка 5–5.5·млн. Ккал.

Таким образом, средняя концентрация ВВ в толще воды в салме Гавриловских островов летом 2024 г. была типичной для прибрежных вод и не отличалась от среднегодовоелетних концентраций ВВ в ближайших губах Мурманского берега [1, 2]. В летний период 2024 г. независимо от изменения запаса ВВ, в осадконакоплении участвовало 3 ± 0.4 % ВВ. За три летних месяца в губе Подпахта и салме Гавриловских островов общее количество аккумулированного ВВ превышает 15 т, в июле отложилось 6 ± 0.5 т, в августе – 5 ± 0.4 т, в сентябре – 4 ± 0.2 т, это сопоставимо с объемами ВВ аккумулируемого в сопредельных губах Мурманского берега [2, 3]. За это же время общее количество вынесенного из губы ВВ можно оценить в 40 ± 2 т. Таким образом, масштаб вертикального потока ВВ на дно в 150 ± 40 раз меньше латерального перемещения ВВ, что сопоставимо с литодинамикой в сопредельных губах Мурманского берега [2]. Результаты исследования дополняют данные по литодинамике прибрежных вод Мурманского берега, но требуют дополнительного изучения.

Работа выполнена в рамках Госзадания ММБИ РАН “Структурно-

динамические трансформации пелагических экосистем морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды” FMEE-2021-0029 (0188-2021-0029) (№ 121091600105-4 (16.09.2021)).

Авторы выражают глубокую признательность директору Кандалакшского государственного природного заповедника Костыренко С.А. и его сотрудникам за предоставленную возможность проведения работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2014. 226 с.
2. Митяев М.В., Герасимова М.В., Павлова Л.Г. Латеральные потоки осадочного вещества в береговых зонах Баренцева и Белого морей // Доклады РАН. 2019. Т. 487. № 5. С. 573–577. doi: [10.31857/S0869-56524875573-577](https://doi.org/10.31857/S0869-56524875573-577)
3. Митяев М.В., Герасимова М.В., Дружкова Е.И. Вертикальные потоки осадочного вещества в прибрежных районах Баренцева и Белого морей // Океанология, 2012. Т. 52. № 1. С. 121–130.

In the summer season of 2024, the weather on the Murmansk coast was warm, dry, and weakly windy. (3–4°C above normal, and less than 50% of the amount of atmospheric precipitation), but the seawater column did not warm up, and higher temperatures were observed only in the bottom horizon. Under these conditions, the gross reserve of sedimentary matter in the water column averaged $12.2 \pm 0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, with a decrease in values from July 2024 to September. Less than 5% of the sedimentary matter in the water column in a suspended state participated in the vertical flow; 3.5–4 tons of matter were deposited on the bottom of the bay per month. Less than 8% of the sedimentary matter in the water column in a suspended state participated in the lateral flow, of which 2% was carried out daily into the open waters of the sea. In a month, 11–12 tons of matter were removed from the bay, which is three times more than accumulated on the bottom. Thus, about $14\text{--}15 \cdot 10^5$ Kcal enters the bottom of the bay per month, while about $50\text{--}55 \cdot 10^5$ Kcal is removed, which is the basis of the nutritional base for all inhabitants of the strait.

Митяев М.В., Герасимова М.В.

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, e-mail: mityaev@mmbi.info)

Влияние атмосферных осадков на материковый сток с Мурманского побережья

Mityaev M.V., Gerasimova M.V.

(Federal state budgetary establishment of a science Murmansk marine biological institute RAS, Murmansk)

The influence of atmospheric precipitation on continental runoff from the Murmansk coast

Ключевые слова: атмосферные осадки, водный сток, зимний водный сток, малые водотоки, Мурманский берег, твердые атмосферные осадки.

Измерение количества атмосферных осадков в конце XX – начале XXI века в центральной части Мурманского берега позволяет утверждать, что годовая сумма атмосферных осадков уменьшилась на четверть, и на 9% снизилось количество твердых атмосферных осадков. В этот же интервал времени, годовой сток восьми малых водотоков побережья уменьшился, по сравнению с концом прошлого века, на 20% и на 10% снизилась его зимняя составляющая. Большие изменения водного стока произошли в меженные периоды, в холодный период года сток уменьшился на 14%, в теплый период года снизился на 7%.

Современные изменения природной среды, которые наблюдаются в Арктическом регионе, существенно влияют на климатический режим Земли [1]. Так один из основных факторов, непосредственно влияющий на климатический режим в Арктике и интенсивно изменяющийся во времени, это пресный сток в воды Северного Ледовитого океана [2–4]. Глобальные изменения материкового стока наблюдаются на арктическом побережье России, особенно это затрагивает крупные евроазиатские реки (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена и Колыма) [5], суммарный сток которых превышает 55% общего пресного стока российских рек в воды Северного Ледовитого океана. Выявлено, что изменяется не просто годовой расход воды этих рек (увеличивается на 128 км^3 в год [6]), но сильно растет зимняя составляющая стока [6, 7]. Следует признать, что такие ежегодные изменения стока арктических рек могут являться стационарным процессом [8]. Исследователи выдвигают четыре основных причины, которые повлияли на изменение материкового стока в Северный Ледовитый океан. Первая причина – создание водохранилищ [9, 10], вторая – деградация многолетней мерзлоты [9, 11, 12], третья – лесные пожары на водосборных площадях [9, 13], четвертая – увеличение количества атмосферных осадков [14, 15]. Компьютерное моделирование трех первых факторов изменения материкового стока позволяют утверждать, что их влияние несколько преувеличено [3], а главным фактором признается увеличение количества

выпадающих атмосферных осадков [15]. Цель работы – оценить влияние атмосферных осадков на изменение материкового стока с Мурманского берега в воды Баренцева моря за последние четверть века.

Расчет количества атмосферных осадков осуществлялся по данным стационарной метеостанции, в пос. Дальние Зеленцы. Водный сток малых водотоков (ручьев) исследовался от р. Воронья на западе до р. Зарубиха на востоке, суточный сток вычислялся через скорость течения воды и площадь сечения русла в замыкающем створе, выше сизигийного прилива. Скорость течения воды измерялась поплавковым методом, площадь сечения русла прямым замером ширины и глубины водотока.

Замеры водного стока в меженные периоды проводились не реже раза в месяц. Замеры в паводковые периоды не реже четырех раз в месяц (в 1998 г., 2001 г., 2005 г. и 2007 г. замеры стока в весенний паводок проводились раз в два дня, а в осенний паводок раз в сутки).

Количество атмосферных осадков на исследуемой территории с 1997 г. по 2022 г. в среднем составляло 507 ± 20 мм, изменяясь от 343 мм до 729 мм. Весь период наблюдения можно разделить на два этапа (1997–2010 гг. и 2010–2022 гг.). В первый этап среднемноголетнее количество атмосферных осадков составляло 578 ± 19 мм, а годовая сумма не опускалась ниже 470 мм. Во второй – среднемноголетнее количество атмосферных осадков – 423 ± 18 мм, а годовая сумма не превышала 520 мм.

Количество твердых атмосферных осадков на исследуемую территорию с 1997 г. по 2022 г. в среднем составляло 213 ± 11 мм, изменяясь от 134 мм до 329 мм. В целом в 1997–2008 гг. количество твердых атмосферных осадков неравномерно снижалось, в дальнейшем постепенно увеличивалось. Выделяются три периода. В первый (1997–2006 гг.) количество твердых атмосферных осадков в среднем составляло 246 ± 16 мм их доля – $41 \pm 2\%$ в общем балансе осадков. Во второй (2007–2015 гг.) в среднем выпадало 166 ± 11 мм, их доля – $35 \pm 2\%$. В третий (2016–2022 гг.) в среднем выпадало 225 ± 17 мм, их доля в среднем $54 \pm 2\%$.

Среднее количество твердых атмосферных осадков, за выделенные по годовой сумме атмосферных осадков периоды, следующее: в 1997–2010 гг. выпадало 222 ± 16 мм, в 2010–2022 гг. – 202 ± 14 мм, различия не достоверны. Доля твердых атмосферных осадков в общем балансе достоверно меняется. Если до 2010 г. она составляла $38 \pm 2\%$, то после 2011 г. в среднем $48 \pm 3\%$. В целом за 25 пять лет наблюдений годовая сумма атмосферных осадков снизилось на четверть, а твердых атмосферных осадков на 9%.

По результатам двадцатипятилетнего мониторинга среднемноголетний годовой сток восьмью малых водотоков Мурманского берега составляет $89 \pm 2 \cdot 10^{-2}$ км³ в год, изменяясь от 0.7 км³ до 1.1 км³ в год. Наибольший водный сток наблюдался в конце XX века (1997–2000 гг.) в среднем $104 \pm 3 \cdot 10^{-2}$ км³ в год, наименьший расход воды отмечался в 2018–2022 гг. в среднем $82 \pm 3 \cdot 10^{-2}$ км³ в год. В течение двадцати пяти лет водный сток

постоянно снижался и сейчас не превышает 80% от стока в конце XX века.

Из года в год происходили резкие изменения зимнего водного стока. Если среднемноголетний зимний сток в районе составляет $28 \pm 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$ за сезон, то в конце прошлого века он составлял $30 \pm 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$ за сезон, а в 2018–2022 гг. – $27 \pm 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$. В 2007–2022 гг. зимний сток постоянно снижался, и сейчас не превышает 90% от зимнего стока, наблюдавшегося в конце первого десятилетия XXI века.

На большей части арктической и субарктической территории России годовая сумма атмосферных осадков увеличивается [16, 17]. На Мурманском берегу годовая сумма атмосферных осадков снизилась на 22% по сравнению с концом XX века, при уменьшении количество твердых атмосферных осадков всего на 2%.

Среднемноголетний годовой водный сток восьми малых водотоков Мурманского берега за 25 лет снизился на 20%, что принципиально отличает его от стока крупных северных рек.

Годовой сток малых водотоков Мурманского берега не зависит от его зимней составляющей ($r=0.158$), так как он определяется объемом стока в весенний паводок [18], но он зависит от годовой суммы атмосферных осадков ($r = 0.754$, $k=23$).

Среднемноголетний зимний сток восьми водотоков Мурманского берега составляет $28 \pm 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$ за сезон. За 25 лет он снизился на 10%, что также принципиально отличается от зимнего материкового стока крупных северных рек [5]. Зимний водный сток с Мурманского берега имеет отрицательную корреляционную связь с количеством твердых атмосферных осадков ($r = -0.582$, $k=23$), вероятно, это связано с тем, что большая часть водной массы заключенной в снежном покрове участвует не в зимнем стоке, а определяет объем стока в весенний паводок. С большой долей вероятности, на Мурманском берегу объем зимнего стока определяется не мягкостью холодного периода года (температур воздуха) и не количеством твердых атмосферных осадков, а количеством и продолжительностью оттепелей.

Наибольшие изменения стока в меженные периоды (за двадцать пять лет) произошли в период февраль–апрель (уменьшился на 14%) и июнь–июль (снизился на 7%). В августе среднемесячный сток увеличился (на 4%), что, возможно, связано с увеличением длительности осеннего половодья за счет вовлечение в него последней декады августа (увеличение количества атмосферных осадков во второй половине августа).

Необходимо отметить еще один фактор, который может оказывать влияние на водный сток с Мурманского берега – понижение порога стока в озерах. Так как все малые водные артерии побережья представляют собой озерно-речные системы, с питанием озерными и атмосферными водами, то изменения в положениях порогов стока в озерах не может не сказываться на стоке выпадающих из них водотоков. Отмечено, что пороги стока в озерах

Мурманского берега постоянно понижаются, что ведет к уменьшению объема водной массы заключенной в депрессиях рельефа, и, следовательно, к уменьшению объема вытекающей из озерных котловин водной массы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ РАН (номер госрегистрации 121091600105-4 (16.09.2021), ГЗ – FMEE-2021-0029 (0188-2021-0029)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moritz R.E., Bitz C.M., Steig E.J. Dynamics of recent climate change in the Arctic // *Science*. 2002. V. 297. P. 1497–1502.
2. Curry R., Mauritzen C. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades // *Science*. 2005. V. 308. P. 1772–1774.
3. McClelland J.W., Dery S.J., Peterson B.J. et al. A panarctic evaluation of changes in river discharge during the latter half of the 20th century // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. L06715. doi: 10.1029/2006GL025753.
4. Peterson B.J., McClelland J.W., Curry R. et al. Trajectory shifts in the Arctic and Subarctic freshwater cycle // *Science*. 2006. V. 313. P. 1061–1066.
5. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
6. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // *Polarforschung*. 2018. V. 2 (87). P. 177–194.
7. Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Изменения климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан // *Водные ресурсы*. 2003. Т. 30 (5). С. 645–654.
8. Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Анализ многолетних изменений колебаний стока рек бассейна Северного Ледовитого океана // *Водные ресурсы*. 2005. Т. 33 (6). С. 645–652.
9. McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Stieglitz M. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change // *Journal of Geophysical Research*. 2004. D18102. doi: 10.1029/2004JD004583
10. Woo M.-K., Thorne R., Szeto K., Yang D. Stream flow hydrology in the boreal region under the influences of climate and human interference // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2007. doi: 10.1098/rstb.2007.2197.
11. Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M. et al. Rising minimum daily flow in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrological cycle // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. G04S47. doi: 10.1029/2006JG000327.
12. Walvoord M.A., Strieg R.G. Increased groundwater to stream discharge from permafrost thawing in the Yukon River basin: Potential impacts on lateral export

of carbon and nitrogen // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L12402. doi: 10.1029/2007GL030216.

13. Chapin F.S., Mcguire A.D., Randerson J. et al. Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system // *Global Change Biology*. 2000. V. 6. P. 211–223.

14. Berezovskaya S., Yang D., Kane D. Compatibility analysis of precipitation and runoff over the large Siberian watersheds // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. L21502. doi:10.1029/2004GL021277.

15. Pavelsky T.M., Smith L. Intercom parison of four global precipitation data sets and their correlation with increased Eurasian river discharge to the Arctic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2006. V. 111. D21112. doi: 10.1029/2006JD007230.

16. Frey K.E., Smith L.C. Recent temperature and precipitation increases in West Siberia and their association with the Arctic Oscillation // *Polar Research*. 2003. V. 22. № 2. P. 287–300.

17. Serreze M.C., Walsh J.E., Chapin III F.S. et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment // *Climatic Change*. 2000. V. 46. P. 159–207.

18. Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2014. 226 с.

Measuring the amount of precipitation in the late 20th and early 21st centuries in the central part of the Murmansk coast allows us to state that the annual amount of precipitation has decreased by a quarter, and the amount of solid precipitation has decreased by 9%. In the same time interval, the annual runoff of eight small watercourses on the coast has decreased by 20% compared to the end of the last century, and its winter component has decreased by 10%. Large changes in water runoff occurred during low-water periods, in the cold period of the year the runoff has decreased by 14%, in the warm period of the year it has decreased by 7%.

Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Малов Г.И., Малов В.И.

(Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: ovdina@igm.nsc.ru)

**Содержание и источники поступления элементов
потенциальных поллютантов в донных отложениях
лимносистем Барабинской низменности (юг Западной
Сибири)**

Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Malov G.I., Malov V.I.

(V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk)

**The content and sources of potential pollutants in the bottom
sediments of the limnosystems in the Baraba Lowland (southern
Western Siberia)**

Ключевые слова: потенциальные поллютанты, донные отложения, лимносистема, Барабинская низменность, техногенная нагрузка

Исследование посвящено оценке влияния техногенной нагрузки на геохимический состав донных отложений малых озер Барабинской низменности (юг Западной Сибири). Сравнивались две группы озер: расположенные вблизи источников техногенного воздействия («техногенные») и удаленные («фоновые»). Выявлены повышенные содержания элементов-поллютантов (Cu, Zn, Cd, Hg) в обеих группах.

В озерных системах происходит объединение и взаимное проникновение компонентов литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы с образованием в каждом конкретном случае уникального геохимического и минерального состава донных отложений. В современном мире человек превратился в геологическую силу природы, способную влиять на саморегуляцию биосферы и, соответственно, процессы взаимодействия компонентов происходят под влиянием техногенной нагрузки, что «сдвигает» естественные пути распределения химических элементов.

Динамика аккумуляции, миграции и дифференциации химических элементов в компонентах озерных систем Барабинской низменности юга Западной Сибири в зависимости от степени антропогенной нагрузки является отражением естественных условий их функционирования в условиях техногенеза в особенности последних 100 лет и делает актуальным изучение динамики осадконакопления в естественных природных водоемах с выявлением закономерностей, обуславливающих геохимический состав компонентов озерных систем и саморегуляцию озерных систем с выявлением повышенных и/или пониженных содержаний химических элементов.

Объектами исследования стали 2 группы малых озер – «техногенная» (озера Бол. Кайлы, Бугристое, Песчаное и Чистое) и «фоновая» (озера

Сарбалык, Суеток, Бильгень, Бол. Курган). Первая группа озер располагается в непосредственной близости от источников техногенной нагрузки (г. Барабинск). Вторая группа озер располагается на северо-востоке от первой группы и рассматривается, как «фоновая», без влияния источников техногенной нагрузки.

Цель работы – оценка содержания и источников поступления элементов потенциальных поллютантов в донных отложениях малых озер Барабинской низменности (юг Западной Сибири).

Прежде чем выбрать точку опробования, были проведены предварительные исследования рельефа дна озера с помощью эхолота Garmin ECHOMAP Plus 62CM. Отбор проб донных отложений проводился в центре озера с ПВХ-лодки Stormline Adventure с использованием цилиндрического пробоотборника ($\varnothing=82$ мм, $L=120$ см) с вакуумным затвором (НПО «Тайфун», Россия). Цилиндрический пробоотборник позволил отобрать стратиграфически ненарушенные керны отложений и сохранить границу вода–донные отложения. Пробы донных отложений отобраны с интервалом 5 см.

Подготовка образцов донных отложений включала взвешивание после сбора с последующей сушкой образцов во время полевых работ до воздушно-сухого состояния. Затем проводилась дальнейшая сушка в лабораторных условиях при комнатной температуре или в сушильном шкафу (LOIP LF 240/300-VS1, Россия, с базовым модулем управления TS87B), настроенном на температуру 50°C. Образцы были тщательно перемешаны и повторно взвешены, а затем измельчены для анализа из образца стандартного объема.

Аналитические исследования проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия. Макро- и микроэлементы определяли методом атомной абсорбции с использованием прибора Solaar M6, оснащенного Зееманским и дейтериевым корректором фона (Thermo Electron, США) и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) с применением iCAP Pro XP Duo (Thermo Scientific, США). Макроэлементный состав определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (ARL-9900-XP, Applied Research Laboratories, США). Морфологию и элементный состав образцов определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Mira 3 Tescan, Tescan, Чехия). Для количественного химического анализа использовали программу INCA Energy 300 (Labspec 5) с использованием стандартных образцов. Донные отложения анализировали с помощью препаратов типа «шашка», изготовленных из эпоксидной смолы ($\varnothing=2$ см, $H=0.5$ см) по методу, разработанному [1].

Средние концентрации элементов в озерных отложениях были сопоставлены с концентрациями элементов в верхней континентальной коре (ВКК) [2]. Малые озера, являясь конечными водоемами стока, отражают в

составе донных отложений - состав почвообразующего субстрата и почв водосборных площадей, несмотря на это, локальные техногенные факторы могут иметь явное значение.

Графики распределения химических элементов в донных отложениях (рисунок), рассмотренных малых озер, имеют схожую конфигурацию. Для всех озер, несмотря на «техногенную» или «фоновую» группу, характерно слегка повышенное содержание Cu, Zn, Cd и Hg.

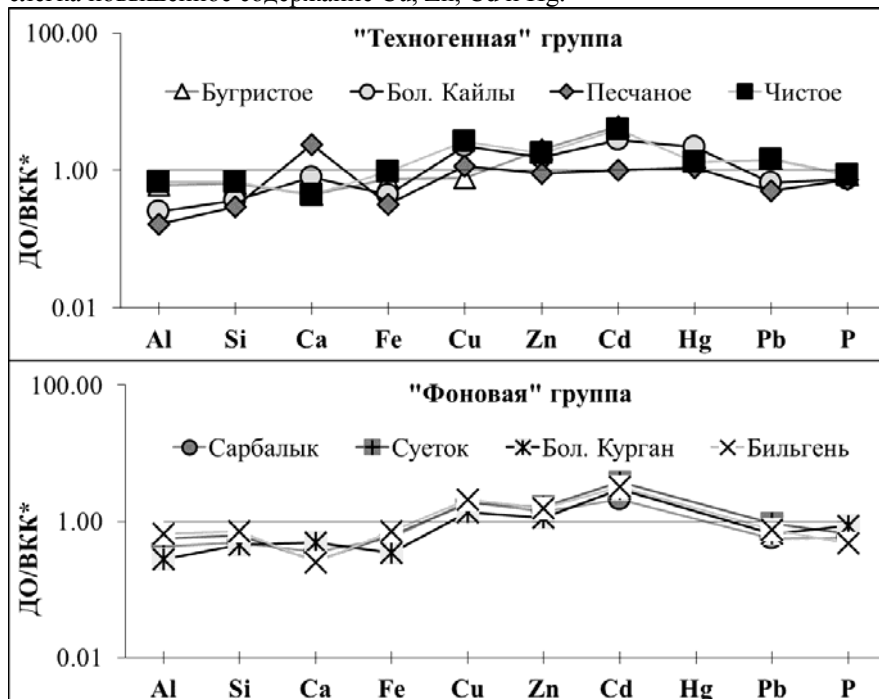


Рисунок. Мультиэлементный спектр распределения изученных элементов, нормированных на значения в ВКК [2], в донных отложениях малых озер Барабинской низменности

Проведенный корреляционный анализ выявил несколько групп элементов, характерных для каждой группы озер и для обеих групп. Для донных отложений «техногенной» группы озер характерна корреляция Al, Si, P, Pb, Fe, которые образуют тесно связанную группу с коэффициентами. Эти элементы, вероятно, могут быть связаны с минеральной пылью и почвенными частицами (эоловая составляющая) и/или выбросами от сжигания угля (зола).

Причем для каждого элемента вероятна именно совокупность разных источников поступления, как, например, для Si. Источники поступления

могут быть, как природные – терригенное и эоловое поступление с площадей водосбора, образование автохтонного биогенного кремнезема $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (створки диатомовых водорослей) непосредственно в озере, так и техногенное – алюмосиликатные микросферы, сформированные при сжигании угля, которые были обнаружены в донных отложениях «техногенной» группы озер.

Сильную связь также демонстрируют Zn и Cd, что типично для элементов потенциальных поллютантов, часто совместно присутствующих в выбросах промышленных предприятий, а также отражающих состав взвеси, сорбированной органическим веществом донного осадка или входящим в его состав. Медь показывает слабые или незначимые связи с основной группой элементов (Al, Si, P, Pb, Fe). Поскольку природные источники Cu на водосборных площадях отсутствуют, предполагается, техногенное поступление. Ртуть часто связана с испарениями от сжигания угля, а медь — с локальными техногенными источниками (например, износ тормозных колодок, что может быть связано с развитой сетью автомобильных и железнодорожных магистралей).

Для «фоновой» группы озер характерна группа (Al, Si, Fe, Cu, Zn). Эти элементы демонстрируют тесную взаимосвязь, что указывает на общий источник происхождения, вероятно, природный (глинистые минералы, почвенные частицы). Однако, источники меди и цинка для данной группы озер требуют дальнейших исследований. Очень сильная корреляция характерна для группы Cd-Pb, что является типичным признаком техногенного воздействия, при этом, Cd слабо коррелирует с основной группой (Al-Si-Fe).

Ca имеет сильную отрицательную корреляцию как в группе «техногенных», так и в группе «фоновых» озер почти со всеми элементами, что указывает на то, что источник кальция (карбонаты кальцит-доломитового ряда) является антагонистом по отношению к источникам других элементов, а формирование карбонатов связано с биохомогенными процессами [3].

Для обеих групп озер особый случай – фосфор. Для группы «техногенных» озер – P практически идеально коррелирует с Pb и сильно с Al, Si. Это может указывать на использование свинец-содержащих фосфатных удобрений в прошлом, что требует дальнейших исследований. Для группы «фоновых» озер, P также показывает сильную отрицательную корреляцию с элементами группы Al-Si-Fe-Cu, что, скорее всего, также связано с сельскохозяйственной деятельностью.

Глобальный характер техногенного воздействия, необходимость мониторинга даже в удаленных регионах и дальнейших исследований подчеркивает обнаружение в «фоновых» озерах следов техногенного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маликов Ю.И. Подготовка образцов к анализу на микрозонде: методические рекомендации. Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1986. 38 с.
2. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.
3. Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Solotchina E.P. Authigenic Carbonates in the Water-Biota-Bottom Sediments' System of Small Lakes (South of Western Siberia) // *Minerals*. 2020. V. 10. № 6. Art. 552.

The study focuses on assessing the impact of anthropogenic load on the geochemical composition of bottom sediments in small lakes of the Baraba Lowland (southern Western Siberia). Two lake groups were compared: those located near sources of technogenic impact ("technogenic") and remote ones ("background"). Elevated concentrations of pollutant elements (Cu, Zn, Cd, Hg) were identified in both groups.

Орешкин В.Н.¹, Цизин Г.И.²

(¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН ФИЦ ПНЦБИ РАН г. Пушкино, e-mail: ski.nikolaev@yandex.ru; ²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра аналитической химии: Москва, e-mail: tsisin@analyt.chem.msu.ru)

Развитие прямого электротермического атомно-абсорбционного анализа порошковых образцов морских и речных взвесей, концентратов вод, донных осадков

Oreshkin V.N.¹, Tsisin G.I.²

(¹Institute of Fundamental Problems of Biology RAS FRC PSCBR RAS, Puschino;

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Analytical Chemistry, Moscow)

Development of direct electrothermal atomic absorption analysis of powdered samples of sea and suspended matter, water concentrates, and bottom sediments

Ключевые слова: Прямой электротермический атомно-абсорбционный анализ порошков, тигельный атолизатор.

Предложена новая модель графитового тигельного атолизатора порошковых образцов для прямого электротермического атомно-абсорбционного определения элементов (Ag, Bi, Cd, Tl и др.) в морской и речной взвеси, концентратах вод, донных осадках.

В различных областях для определения ультрамалых количеств рассеянных элементов в геологических образцах и объектах окружающей среды часто применяют электротермический атомно-абсорбционный (АА) анализ, в том числе твердых проб (порошков, суспензий). В отличие от альтернативного варианта с полным растворением образцов в этом случае снижается возможность загрязнения при их контакте с посудой, реагентами, а также потерь элементов, особенно на стадии разложения. При растворении образцов неизбежно их разбавление, что снижает чувствительность анализа. Преимущества очевидны, поэтому продолжается разработка способов прямого АА анализа твердых образцов, помещаемых в графитовые электротермические атолизаторы [1–4] различных типов (кюветы, печи, тигли, стержни и др.). При использовании атолизаторов твердых образцов непросто бороться с неизбежными неселективными и матричными помехами. Для уменьшения влияния состава используют разные подходы, известным и эффективным является способ предварительного селективного фракционного испарения образца с конденсацией паров на вспомогательной поверхности-приемнике для последующего независимого АА анализа термомодифицированной матрицы-конденсата, т.е. проведение двухстадийного цикла. Этот способ

применяют в усовершенствованных моделях атомизаторов различных типов. Авторы предпочтительно используют тигельные конструкции-атомизаторы с поперечным нагревом и с вертикально расположенными зонами испарения конденсации и атомизации [2–4]. В таких атомизаторах достаточно просто экспериментально выбирать варианты термического разложения и испарения-конденсации для уменьшения помех с учётом матричного состава органоминеральных образцов массой до 10 мг и более.

Существенная проблема состоит в том, что возможность определения следовых количеств элементов затруднена, если стадия термического разложения и испарения образца, размещённого на дне тигля, характеризовалась интенсивным испарением основы, выбросом крупных и мелких частиц и увеличением неселективных помех в аналитической зоне (общий недостаток атомизаторов, использующих фракционную конденсацию). Весьма простой подход для уменьшения негативных эффектов может заключаться в изменении конструкции тигельной зоны испарения и особенностей размещения образца в этой зоне, влияющих на условия термического разложения и испарения органических и минеральных компонентов. Задача упрощается, если учесть известные способы по пробоподготовке геологических образцов к элементному физико-химическому анализу, в том числе и АА анализу, обеспечивающие гомогенизацию и измельчение до частиц менее 0.1 мм. Поэтому в экспериментах были испытаны тигли с изменённой конфигурацией рабочей зоны испарения, влияющей на распределение и условия испарения дозируемой навески образца с частицами менее 0.1 мм.

Новизна и суть предлагаемого конструктивного решения модели атомизатора заключается в следующем. Зону испарения в тигле можно дополнить графитовым блоком-контейнером из пористого газопроницаемого графита для формирования геометрических особенностей этой зоны с ячейками-каналами малого (< 1 мм) диаметра, разделяющими, подобно ситу, навеску порошкового образца на отдельные, изолированные друг от друга стенками каналов, микрообразцы. Такое решение обеспечивает размещение в ячейках-каналах, которые являются независимыми зонами испарения, малых доз образца, причём без уменьшения общей анализируемой массы, т.е. представительности пробы (рисунки 1, 2).

Экспериментальная модель тигельного атомизатора с ячейками-каналами выполнена на базе ранее использованных конструкций [2, 3] и испытана в сочетании с АА спектрометром “Сатурн-2” и другими приборами. Атомизатор состоит из трех графитовых цилиндрических блоков (графит типа МПГ), помещённых между независимыми электроконтактами и формирующих зоны испарения, конденсации и атомизации (рис. 1). Первый блок – собственно графитовый тигель с установленным в его объёме графитовым контейнером (рис. 2). Тигель

может быть монолитным или представлять разборную конструкцию из сменного графитового основания, на которое устанавливается полый цилиндр. Разборная конструкция упрощает замену использованного контейнера без существенной разборки всего устройства. Контейнер имеет цилиндрическую форму и для размещения и разделения порошкового образца в его объеме выполнены вертикальные сквозные отверстия, т.е. ячейки-каналы малого диаметра (в экспериментах 0.3–0.8 мм и количеством каналов до 10–20). Второй цилиндрический блок расположен над тиглем с небольшим теплоизолирующим зазором (0.5–2 мм). Третий цилиндрический блок установлен на торцевую поверхность второго блока и формирует зону атомизации с конусной внутренней поверхностью, переходящей в просвечиваемый аналитический объем в цилиндрическом отверстии с возможностью локализации паров. Атомизатор обеспечивает последовательное применение первой и второй стадии аналитического цикла. На первой стадии осуществляется термическое разложение, озоление и фракционное испарение порошкового образца, размещенного в ячейках-каналах контейнера при постепенном увеличении температуры до значений 1200–2000°C за время 20–60 с. На второй стадии проводили импульсный нагрев (4–8 с) цилиндра с конденсатом и с некоторым опережением – второго цилиндра с аналитической зоной до температуры 1600–1900°C при выдерживании нагрева тигля.

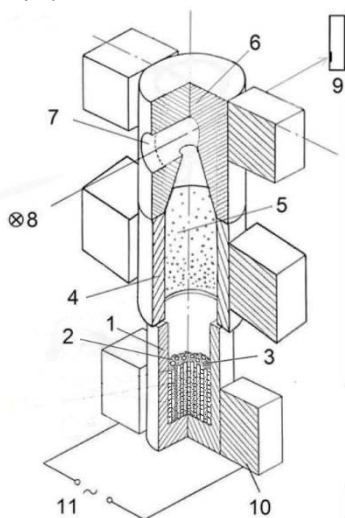


Рис. 1. Графитовый тигельный электротермический атомизатор твердых образцов с зонами испарения, конденсации и атомизации:

1 – тигель (зона испарения); 2 – контейнер; 3 – ячейки-каналы контейнера с порошковым образцом; 4 – цилиндрический блок (зона конденсации); 5 – конденсат; 6 – цилиндрический блок (зона атомизации); 7 – просвечиваемое отверстие

(аналитическая зона); 8 – источник излучения; 9 – спектрометр; 10 – независимые графитовые держатели – электроконтакты; 11 – источник питания

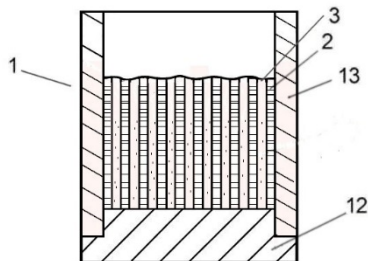


Рис. 2. Модификация графитового тигля с ячейками-каналами:

1 – разборная модель графитового тигля; 2 – многоканальный контейнер; 3 – ячейки-каналы контейнера с порошковым образцом; 12 – основание; 13 – цилиндр

Атомизатор использован для определения Ag, Bi, Cd, In, Hg, Pb, Tl в коллекционных органоминеральных образцах морских и речных взвесей, концентратов вод и донных осадков массой до 10 мг. На основании данных предыдущих работ, были выбраны образцы, характеризующиеся высоким уровнем неселективного поглощения и значениями отношения сигнала абсорбции элемента к сигналу абсорбции неселективного поглощения $\ll 1$. Для улучшения метрологических характеристик определения элементов необходимо уменьшать неселективные помехи, в основном, вследствие поступления частиц в аналитическую зону с газовой фазой образца. Поэтому были получены данные о значениях сигнала абсорбции неселективного поглощения при определении элементов в порошковых образцах концентратов и взвесей с применением атомизаторов с различной конструкцией зоны испарения. Результаты показали, что применение тигельного атомизатора с контейнером в зоне испарения, в которой общая масса образца разделялась на малые дозы и распределялась в независимые ячейки-каналы, обеспечивает снижение уровня неселективного поглощения по сравнению с атомизатором с навеской образца, размещённой на дне тигля (значения составили <0.01 – 0.4 и 0.1 – 1.2 соответственно). Эксперимент показал, что возможно определение элемента в образцах с применением контейнера с ячейками-каналами диаметром 0.8 и 0.3 мм. При уменьшении диаметра ячеек уровень неселективного поглощения уменьшается, но величина аналитического сигнала изменяется мало. Такая тенденция, очевидно, является следствием конструктивных изменений в зоне испарения. Термическое разложение, озонение и испарение разделённых малых количеств образца в узких каналах с равным внутренним объёмом рабочих зон происходит в более близких условиях с уменьшенной интенсивностью выделения газообразных продуктов, влияния

конвекционного потока, эффектов взаимодействия продуктов разложения. При этом пористая газопроницаемая структура графитовых стенок каналов обуславливает возможность межканальной диффузии (фильтрации) паров образца, задержку испарения, увеличение времени пребывания твёрдых частиц в зоне испарения и их взаимодействия с поверхностью каналов. Все эти факторы приводят, вероятно, к получению суммарного синергетического эффекта и способствуют большей степени атомизации компонентов образца в процессе диффузионно-конвекционного переноса паров в ячейках-каналах контейнера и уменьшение или отсутствие выброса неиспарившихся частиц. В результате достигается увеличение значений отношения сигнал/шум в аналитической зоне и снижение пределов обнаружения элементов в образцах сложного состава в 2–10 раз до 0.001–0.01 ppm. Относительное стандартное отклонение при определении элементов вдали от предела обнаружения (на кларковом уровне содержания) обычно не превышает 0.20, что вполне удовлетворительно для целей геохимии и экологии. Таким образом, новая модель атомизатора позволяет решать аналитические задачи по прямому атомно-абсорбционному определению следов элементов в органоминеральных образцах взвесей, концентратов вод, донных осадков с высокими значениями неселективных и матричных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М.: Техносфера, 2009. 784 с.
2. Орешкин В.Н., Цизин Г.И. Опыт конструирования и применения тигельных электротермических атомизаторов для атомно-абсорбционного анализа твёрдых образцов // Журнал аналитической химии. 2014. Т. 69. № 3. С. 307–315.
3. Орешкин В.Н., Цизин Г.И., Таций Ю.Г. Специальные способы термообработки речных и морских взвесей при определении следов элементов // Геохимия. 2018. № 3. С. 290–296.
4. Орешкин В.Н. Способ электротермического атомно-абсорбционного анализа состава порошковых образцов и устройство для его осуществления. Патент России. 2023. № 2806706.

A new model of a graphite crucible atomizer for direct electrothermal atomic absorption determination of elements (Ag, Bi, Cd, Tl, etc.) in sea and river suspended matter, water concentrates, and bottom sediments has been proposed.

Савенко А.В., Савенко В.С.

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва,
e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru)

Иммобилизация фтора из морской воды при гальмиролизе магматических пород

Savenko A.V., Savenko V.S.

(Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Immobilization of fluorine from seawater during halmyrolysis of igneous rocks

Ключевые слова: фтор, морская вода, океаническая кора, гальмиролиз, геохимический баланс

По результатам длительных 6-летних экспериментов обнаружено существенное снижение концентрации растворенного фтора в морской воде при ее взаимодействии с ультраосновными и основными магматическими породами: дунитом, габбро-норитом и базальтом. Показано, что гальмиролиз пород океанической коры является значимой расходной статьей геохимического баланса фтора в Мировом океане.

Подводное выветривание (гальмиролиз) составляет одну из наименее изученных статей геохимического баланса растворенных компонентов в океане. В [1] была показана важная роль гальмиролиза терригенного осадочного материала как поглотителя фтора из морской воды, однако сведения о поведении фтора при гальмиролизе магматических пород океанической коры до сих пор отсутствуют и неясно, являются ли эти породы источником или стоком растворенного фтора в океане. Авторы предприняли попытку решения этого вопроса с помощью экспериментального моделирования.

В экспериментах были использованы измельченные до размера <20 мкм образцы ультраосновных (дунит) и основных (габбро-норит и базальт) магматических пород с химическим составом, приведенным в таблице, которые рассматривались в качестве типичных представителей магматических пород океанической коры.

Переменные навески пород от 0.25 до 8.0 г помещали в пластиковые пробирки объемом 50 мл и добавляли к ним по 40 мл природной морской воды с соленостью 35‰ и концентрацией растворенного фтора 1.30 мг/л. Герметично закрытые пробирки с суспензиями ежедневно примерно по 6 ч перемешивали на шейкере на протяжении 6 лет. Опыты проводили при комнатной температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$. По окончании экспозиции пробы некоторое время выдерживали без перемешивания, после чего отфильтровывали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.22 мкм. В фильтрате определяли величину pH и концентрацию фтора методом прямой потенциометрии в присутствии ацетатного солевого буфера [2] с калибровкой фторидной

измерительной цепи по стандартным растворам, имеющим состав нормальной морской воды и содержащим разные количества фтора.

Таблица. Коэффициент пропорциональности k в уравнении (1) для разных карбонатных минералов при поглощении фтора из природной морской воды с соленостью 35‰, содержащей 1.29 мг F/л

Компонент	Порода		
	дунит	габбро-норит	базальт
SiO ₂	40.73	51.30	51.48
TiO ₂	0.02	0.17	1.59
Al ₂ O ₃	2.10	14.22	15.54
FeO	13.81	5.38	9.50
MnO	0.18	0.14	0.13
MgO	41.77	17.81	7.14
CaO	1.20	8.18	11.40
Na ₂ O	0.12	1.12	2.91
K ₂ O	0.06	0.10	0.13
P ₂ O ₅	0.02	–	0.17
Сумма	100.01	98.42	100.00

Результаты экспериментов показали, что с увеличением массового отношения порода / морская вода (m , г/л) концентрация фтора ($[F^-]$, мг/л) нелинейно снижается, причем поглощение фтора дунитом происходит с большей интенсивностью по сравнению с габбро-норитом и базальтом, для которых различия несущественны (рис. 1). Исходя из формы зависимости $\Delta[F^-]$ от m , можно предположить, что она описывается гиперболической функцией

$$-\Delta[F^-] = \frac{am}{1+bm}, \quad (1)$$

где a и b – постоянные коэффициенты. Поскольку удельное поглощение фтора твердой фазой $x_F = -\Delta[F^-]/m$, из (1) следует, что

$$x_F = \frac{a}{1+bm}, \quad (2)$$

или

$$\frac{1}{x_F} = \frac{1}{a} + \left(\frac{b}{a}\right)m. \quad (3)$$

Вследствие перемешивания водной толщи гальмиролиз на границе вода–дно осуществляется в условиях сильного превышения массы морской воды над массой обнажающихся на дне океана магматических пород, т.е. при $m \rightarrow 0$. В этом случае, согласно (3), $x_F^0 = a$.

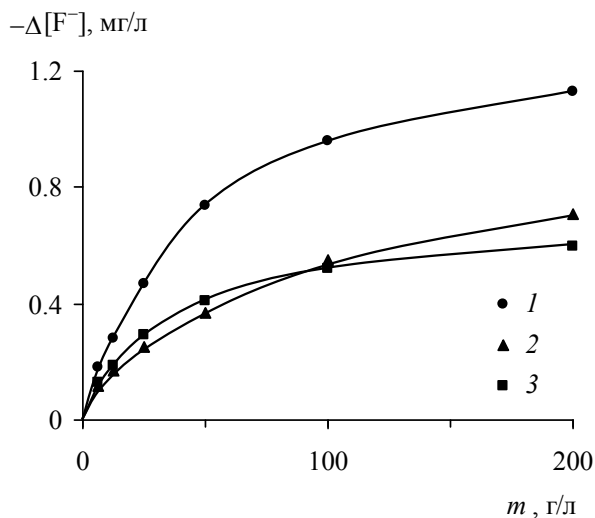


Рис. 1. Зависимость изменения концентрации растворенного фтора ($\Delta[F^-]$) от массового отношения порода / морская вода (m) после 6 лет взаимодействия: 1 – дунит, 2 – габбро-норит, 3 – базальт.

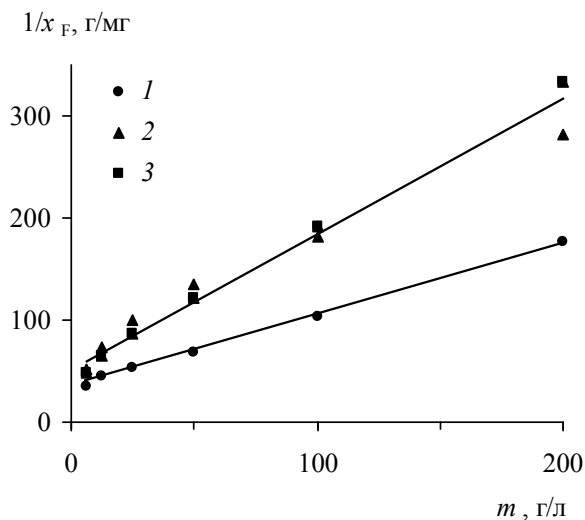


Рис. 2. Зависимость величины, обратной удельному поглощению фтора твердой фазой (x_F), от массового отношения порода / морская вода (m) после 6 лет взаимодействия: 1 – дунит, 2 – габбро-норит, 3 – базальт.

Расчет параметров показанной на рис. 2 линейной зависимости $1/x_F$ от m дает значения $1/a$, равные 33.1 для дунита и 46.6 для габбро-норита и базальта. Отсюда получим величины поглощения фтора из морской воды дунитом $x_F^0 = 0.030$ мг/г, а также габбро-норитом и базальтом $x_F^0 = 0.021$ мг/г, что соответствует 13 и 5.5% среднего содержания фтора в ультраосновных и основных породах (ультрабазитах и базитах) [3].

Сделанные оценки следует рассматривать как минимальные, поскольку за 6 лет проведения экспериментов не могло произойти полного превращения исходного материала в продукты гальмиролиза, которое достигается в течение миллионов и десятков миллионов лет протекания процесса в природе. При этом гальмиролиз не только локализуется вблизи границы вода–дно, но и проникает на значительные глубины в результате циркуляции морской воды по трещинам пород.

П. Руде и Р. Аллер [1] обратили внимание на то, что приходные статьи геохимического баланса растворенного фтора в океане значительно превышают расходные статьи и связали это с присутствием в речном стоке так называемых “циклических солей” – морских солей, приносимых на сушу через атмосферу. Полученные нами данные об иммобилизации фтора из морской воды магматическими породами указывают на наличие нового, ранее не учитывавшегося “стока” этого элемента, поскольку гальмиролиз пород океанической коры должен вносить заметный вклад в расходную часть геохимического баланса растворенного фтора в океане.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rude P.D., Aller R.C. Fluorine mobility during early diagenesis of carbonate sediment: An indicator of mineral transformations // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. № 9. P. 2491–2509.
2. Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.
3. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // *Геохимия*. 2003. № 7. С. 785–792.

Based on the results of long-term 6-year experiments, a significant decrease in the concentration of dissolved fluorine in seawater was found during its interaction with ultrabasic and basic igneous rocks: dunite, gabbro-norite, and basalt. It was shown that halmyrolysis of oceanic crust rocks is a significant expense item of the geochemical balance of fluorine in the World Ocean.

Савенко А.В., Савенко В.С.

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва,
e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru)

Иммобилизация фтора из морской воды карбонатными минералами

Savenko A.V., Savenko V.S.

(Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Immobilization of fluorine from seawater by carbonate minerals

Ключевые слова: фтор, морская вода, осадочные карбонатные минералы

Проведены длительные эксперименты, в которых после 9 лет экспозиции изучалась иммобилизация растворенного фтора из морской воды карбонатными минералами. Установлено, что по способности поглощать фтор исследованные карбонатные минералы располагаются в ряд: синтезированный доломит > природный доломит >> кальцит > арагонит. Предполагается, что преимущественное накопление фтора в магнезиальных карбонатах обусловлено более прочной связью Mg–F по сравнению с Ca–F.

Важной особенностью геохимии фтора в осадочном процессе служит его повышенное содержание в магнезиальных карбонатных породах: доломитах и доломитизированных известняках [1–4], а также часто обнаруживаемая отчетливая положительная корреляция между содержанием фтора и магния в осадочных карбонатных породах в целом [5]. Эта закономерность может иметь две причины. Поскольку высокомагнезиальные карбонаты образуются в основном в осолоненных водоемах на начальных стадиях эвапоритового процесса [6], повышенное содержание в них фтора может быть связано с относительно высокими концентрациями фтора в водной среде, как, например, в водах Каспийского и Аральского морей [7–9]. Альтернативное объяснение допускает возможность специфического поглощения фтора магнезиальными карбонатами, которое существенно выше по сравнению с обычными известняками. Экспериментальное изучение соосаждения фтора с карбонатными осадками подтвердило зависимость между содержанием в твердой фазе фтора и магния [10, 11], однако состав растворов, из которых осаждались карбонаты, сильно отличался от состава вод природных бассейнов осадконакопления. Настоящая работа посвящена выяснению правомерности второй гипотезы на основе данных экспериментального моделирования.

В экспериментах были использованы измельченные до размера <20 мкм образцы кальцита (химический реактив ос.ч.), арагонита (синтезированная О.С. Покровским фаза из чистых растворов CaCl_2 и NaHCO_3) и доломита (химический реактив х.ч. и природный минерал из Домодедовского

месторождения).

Навески образцов массой от 0.25 до 8.0 г помещали в герметично закрывающиеся пластиковые контейнеры объемом 50 мл и добавляли к ним по 40 мл природной морской воды с соленостью 35‰ и концентрацией растворенного фтора 1.29 мг/л. Суспензии в течение 7 лет ежедневно примерно по 6 ч перемешивали на шейкере и затем 2 года выдерживали без перемешивания. Опыты проводили при комнатной температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$. По окончании эксперимента растворы отфильтровывали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.22 мкм. В фильтрате сразу определяли величину pH и концентрацию фтора методом прямой потенциометрии в присутствии ацетатного солевого буфера [12]. Калибровку фторидной измерительной цепи выполняли по стандартным растворам, имеющим состав нормальной морской воды и содержащим разные количества фтора.

Как показано на рисунке, удельное поглощение фтора (x_F , мкг/г) линейно связано с его конечной концентрацией в морской воде ($[F^-]$, мг/л):

$$x_F = k[F^-], \quad (1)$$

при этом по величине коэффициента пропорциональности k (таблица) исследованные карбонатные минералы располагаются в ряд

синтезированный доломит > природный доломит >> кальцит > арагонит.

Менее интенсивное поглощение фтора природным доломитом по сравнению с химически чистой синтезированной фазой связано с изначальным присутствием в нем фтора в количестве 680 мкг/г.

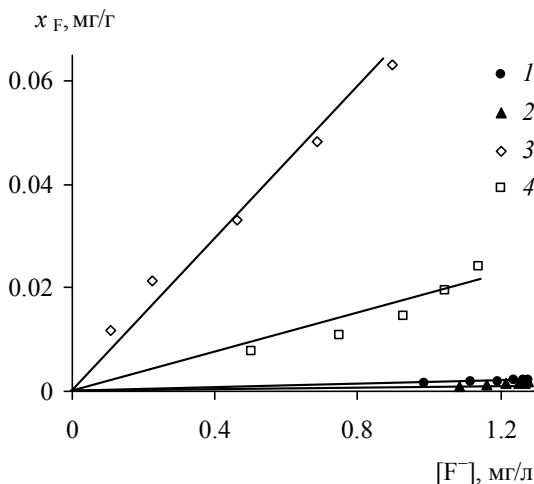


Рисунок. Зависимость удельного поглощения фтора карбонатными минералами от конечной концентрации фтора в морской воде:
1 – кальцит (синтез); 2 – арагонит (синтез); 3 – доломит (синтез);

4 – доломит (природный).

Таблица. Коэффициент пропорциональности k в уравнении (1) для разных карбонатных минералов при поглощении фтора из природной морской воды с соленостью 35‰, содержащей 1.29 мг F/л

Минерал	Коэффициент пропорциональности k в уравнении (1)	Коэффициент корреляции r	x_F (мкг/г) при $[F^-] = 1.3$ мг/л
Кальцит (синтез)	1.6	0.930	2.1
Арагонит (синтез)	1.2	0.739	1.6
Доломит (синтез)	71.6	0.986	93.1
Доломит (природный)	18.0	0.918	23.4

Значительно большее накопление фтора в доломите относительно кальцита и арагонита согласуется с результатами экспериментов [10, 11] по соосаждению фтора с карбонатами кальция разной степени магнезиальности, которые также показали увеличение содержания фтора в твердой фазе с ростом содержания в ней магния. Более низкое удельное поглощение фтора в наших экспериментах, по-видимому, обусловлено преимущественно адсорбционной иммобилизацией фтора на поверхности частиц карбонатных минералов, тогда как в процессе соосаждения участвует весь объем твердой фазы.

Таким образом, экспериментальные данные однозначно указывают на химическую природу связи повышенных концентраций фтора с содержанием магния в карбонатных породах. Магний образует с фтором комплексы MgF^+ , прочность которых в 6 раз превышает прочность аналогичных кальциевых комплексов CaF^+ [13]. Можно предположить, что подобное соотношение сил связей $Mg^{2+} - F^-$ и $Ca^{2+} - F^-$ характерно для твердых фаз карбонатов кальция и магния и не только относится к кристаллической структуре минералов, но и распространяется на адсорбированные компоненты. В этом случае поглощение фтора как в процессе соосаждения, так и при адсорбции должно быть тем больше, чем выше содержание магния в карбонатных минералах, что и установлено экспериментально.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушинский Г.И. К вопросу о генезисе флюорита в осадочных породах // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1936. № 5. С. 775–793.
2. Казаков А.В., Соколова Е.И. Условия образования флюорита в

осадочных породах (флюоритовая система) // Тр. Института геологических наук. Вып. 114. (№ 40). Геол. сер. М., 1950. С. 22–64.

3. Бобров В.П. О распределении фтора в хемогенных породах верхнего палеозоя Донбасса // Тез. докл. 2-й геологич. конф. “Степановские чтения”. Артемовск, 1968. С. 125–126.

4. Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2006. 608 с.

5. Ронов А.Б., Гирин Ю.П., Ермишкина А.И. и др. Геохимия фтора в осадочном цикле // Геохимия. 1974. № 11. С. 1587–1612.

6. Страхов Н.М., Борнеман-Старынкевич И.Д. О стронции, боре и броне в породах нижнепермской галогенной толщи Башкирского Приуралья // Вопросы минералогии, геохимии и петрографии. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 262–274.

7. Маев Е.Г., Савенко В.С., Широкова В.А. Фтор в водах Аральского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1981. № 3. С. 82–85.

8. Савенко В.С. Фтор в водах Каспийского моря // Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 156–159.

9. Савенко А.В., Савенко В.С. Степень насыщения вод Аральского моря по CaF_2 в современный период // ДАН. Науки о Земле. 2025. Т. 524. № 1. С. 41–46.

10. Ohde S., Kitano Y. Incorporation of fluoride into Ca-Mg carbonate // *Geochem. J.* 1980. V. 14. № 6. P. 321–324.

11. Okumura M., Kitano Y., Idogaki M. Incorporation of fluoride ions into calcite – Effect of organic materials and magnesium ions in a parent solution // *Geochem. J.* 1983. V. 17. № 5. P. 257–263.

12. Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.

13. Smith R.M., Martell A.E. Critical stability constants. V. 4. Inorganic complexes. N.Y.: Plenum Press, 1976. 257 p.

Long-term experiments were carry out in which the immobilization of dissolved fluorine from seawater by carbonate minerals was studied after 9 years of exposure. It was established that, in terms of their ability to fluorine uptake, the studied carbonate minerals are arranged in the following order: synthesized dolomite > natural dolomite >> calcite > aragonite. It is assumed that the preferential accumulation of fluorine in magnesian carbonates is caused by the stronger Mg–F bond compared to Ca–F.

**Сивков В.В.^{1,2}, Пономаренко Е.П.^{1,2}, Муратова А.А.^{1,2},
Кречик В.А.^{1,2}**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

vadim.sivkov@atlantic.ocean.ru; ²Балтийский федеральный университет им. И.Канта, г. Калининград)

Хемотрогенные нефеловидные слои в юго-восточной части Балтийского моря

**Sivkov V.V.^{1,2}, Ponomarenko E.P.^{1,2}, Muratova A.A.^{1,2},
Krechik V.A.^{1,2}**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad)

The chemogenic nepheloid layers in the southeastern Baltic Sea

Ключевые слова: редокс-барьер, взвешенное вещество, Гданьская впадина, Готландская впадина

Вертикальное распределение взвеси в ноябре 2023 – августе 2024 гг. изучено на двух ключевых точках: в Гданьской впадине и на склоне Готландской впадины. Промежуточные хемотрогенные нефеловидные слои в обеих впадинах зафиксированы только в ноябре 2023 г., что позволяет предположить эпизодический процесс их образования на редокс-барьере.

Актуальность изучения гипоксии и аноксии возрастает не только в связи с эвтрофикацией морей и океанов, но и в контексте современной климатической повестки [1]. Известно, что содержащие кислород затоки североморских вод в Балтийское море создают контакт окислительных и восстановительных условий [2]. На геохимическом барьере «O₂-H₂S» (редокс-барьере) при активном влиянии бактерий происходит резкое изменение форм миграции химических соединений. Гидроокислы железа и марганца образуют гели, которые формируют нефеловидные слои [3–5]. Ранее они отмечались предположительно в Гданьской и Восточно-Готландской впадинах Балтийского моря, где окислительно-восстановительные условия подвержены сильной изменчивости [6]. С другой стороны, совпадающий по глубине с оксиклином перманентный галоклин также способен концентрировать взвесь, переносимую течениями, внутренними волнами, мезомасштабными вихрями. Таким образом, для уверенной идентификации хемотрогенных нефеловидных слоев необходимы синхронные данные по вертикальному распределению взвеси, полученные на фоне концентрации кислорода. Такая задача решалась в 54–56-м рейсах НИС «Академик Борис Петров» (ноябрь, декабрь 2023 г., июль 2024 г.) и 68-м рейсе ПС «Академик Иоффе» (август 2024 г.).

Материал и методы. В качестве ключевых были выбраны две точки – в Гданьской впадине и в Ю части Восточно-Готландской впадины (рис.1).

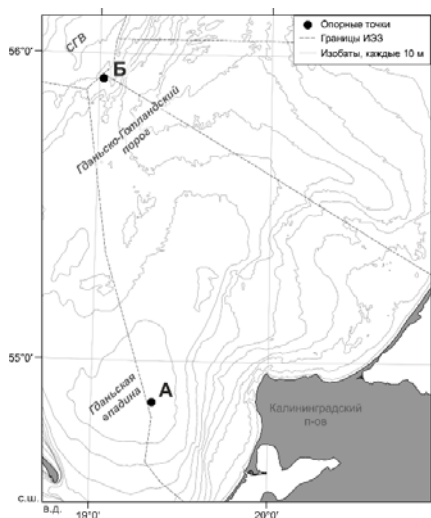


Рис. 1. Район исследования и расположение ключевых точек исследования: А – в центре Гданьской впадины, Б – в южной части Восточно-Готландской впадины. СГВ – склон Готландской впадины.

Для определения относительной концентрации тонкодисперсной взвеси использовался датчик мутности Seapoint Turbidity Meter, установленный на зонде SAIV SD208 (Норвегия). Данные получены в единицах мутности по формазину (ЕМФ). Концентрация кислорода измерялась оптическим датчиком SST Optical Oxygen Sensor, установленным на гидрофизическом зонде Sea&Sun Technology CTD 48Mc (Германия). Для верификации его данных использовались значения концентрации растворенного кислорода, полученные в пробах воды методом Винклера. Для уточнения положения редокс-барьера использовались значения концентрации растворенного сероводорода, рассчитанные по концентрации растворенных сульфидов, определенной в пробах воды спектрофотометром КФК-3КМ (длина волны 670 нм). Пробы воды отбирали гидрологическим комплексом Hydro-Bios MWS12 Slimline (Германия), оснащенным батометрами Нискина. Гидрохимические анализы проводились методами, описанными в работе [7].

Результаты и обсуждение. В Гданьской впадине в ноябре 2023 г. удалось зафиксировать высоко концентрированный нефелоидный слой (рис. 2а).

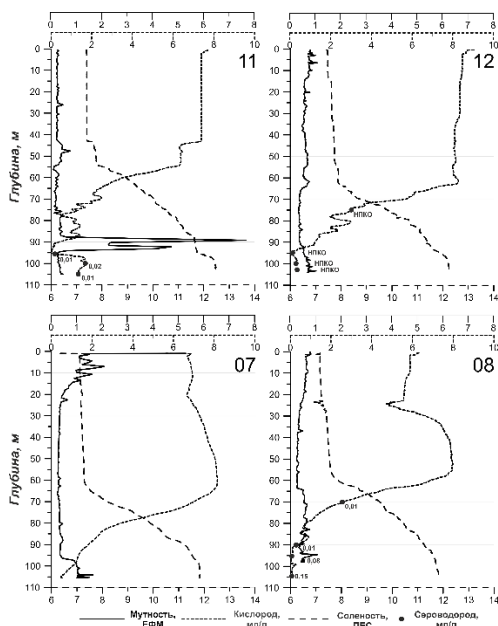


Рис. 2. Изменение гидрологических и гидрохимических параметров в Гданьской впадине в ноябре (11) и декабре (12) 2023 г., июле (07) и августе (08) 2024 г. Черными точками на кривой кислорода нанесены значения сероводорода на глубинах его отбора.

Известно, что повышенные значения солёности и температуры в галоклине обусловлены интрузиями глубинных вод из Юго-Западной Балтики в Гданьскую впадину [8, 9]. Эти интрузии в определенной степени аэрируют галоклин и придонный слой Гданьской впадины. В нашем случае на вертикальном распределении кислорода прослеживается три интрузии. Максимум мутности находится под средней по глубине интрузией – в нижней части галоклина (глубины 87–93 м). Нефелоидному слою соответствует падение содержания растворенного кислорода от 1 мл/л практически до нуля. Это дает основания предполагать генетическую связь нефелоидного слоя с редокс-барьером. Резкие границы и небольшая мощность нефелоидного слоя по глубине также говорят в пользу его биогеохимического происхождения на редокс-барьере, поскольку микрочастицы гелей гидроокислов могут существовать в относительно узком диапазоне условий. Их распространению вверх от редокс-барьера препятствует высокий градиент плотности в галоклине (пикноклине), который подавляет турбулентное перемешивание, и сила тяжести, вызывающая седиментацию твердых частиц. В ходе седиментации гидроокислы возвращаются в восстановительные условия и, как следствие,

вновь переходят в растворенную форму. Примечательно, что нижняя часть рассматриваемого нефелоидного слоя находится практически в бескислородных условиях, т.е. в восстановительной среде. Это может быть обусловлено тем, что растворение оседающих частиц не происходит мгновенно, а требует определенного времени, особенно при их коагуляции и флокуляции. Кроме того, «ступенька» в вертикальном распределении солености на глубине нефелоидного слоя, указывает на возможность усиления турбулентного перемешивания, в данном случае ускоряющего седиментацию. В верхней интрузии (глубина 68–76 м) содержание кислорода уменьшается с глубиной от 2.5 до 0.4 мл/л. Нефелоидный слой здесь отсутствует. Можно предположить, что такое содержание кислорода слишком высоко для существования редокс-барьера. В нижней (придонной) интрузии при содержании кислорода 1.5–2.0 мл/л и предельно низком содержании сероводорода нефелоидный слой также не проявился.

В декабре 2023 г. хомогенный нефелоидный слой отсутствовал, несмотря на выраженный оксиклин и следовые концентрации сероводорода (рис. 2б). Это позволяет предположить, что процесс образования хомогенных нефелоидных слоев не постоянный, а эпизодический. Контакт глубинных насыщенных растворенными элементами (металлами) бескислородных вод с поступающими водами, содержащими кислород, приводит в действие биогеохимический механизм изменения формы миграции на редокс-барьере. В результате сравнительно быстро (за неделю-месяц) эти элементы переходят из раствора во взвешенное состояние и в результате седиментации накапливаются в донных осадках. До нового насыщения бескислородных глубинных вод растворенными металлами затоки североморских вод, несущие кислород, не будут вызывать интенсивного взвесеобразования на редокс-барьере.

В июле 2024 г. на фоне содержания кислорода <1 мл/л проявилось незначительное повышение мутности в придонном слое (рис. 2в). По мощности этот нефелоидный слой соответствует придонному перемешанному слою (см. профиль солености). С учетом скопления взвеси в поверхностном слое моря, можно предположить, что в данном случае был зафиксирован придонный «отклик» на активное сезонное биопродуцирование в условиях повышенной придонной гидродинамики. В августе 2024 г. профиль мутности не достиг дна при восстановительных условиях в придонном слое. При этом отмечено умеренное повышение содержания взвешенного вещества в галоклине (рис. 2г). По-видимому, это следствие задержки оседающего детрита после июльского пика биопродуктивности в поверхностном слое моря.

На склоне Восточно-Готландской впадины в ноябре 2023 г. на глубине 73–74 м был обнаружен тонкий нефелоидный слой на фоне содержания кислорода <1 мл/л (рис. 3а). Сочетание морфологии этого слоя и близости редокс-барьера позволяет предположить, что он имеет хомогенное

происхождение. Ниже него, под галоклином, в бескислородной зоне, располагался развитый придонный нефелоидный слой (глубины 75–105 м). Поскольку точка наблюдений была выбрана на основном пути распространения североморских вод, то очевидно, что в формировании этого слоя внесли значительный вклад придонные течения.

В декабре 2023 г. гипотетический нефелоидный слой биогеохимического происхождения не проявился. Придонный, гидродинамически обусловленный нефелоидный слой утратил вертикальный градиент и был осложнен предположительно проявлениями гравитационных склоновых процессов. Подобные процессы переноса осадочного материала особенно активизируются во время штормов, которые наблюдались во время съемки (рис. 3б). В июле и августе 2024 г. как придонные, так и промежуточные (хемогенные) нефелоидные слои не были выражены (рис. 3в, г).

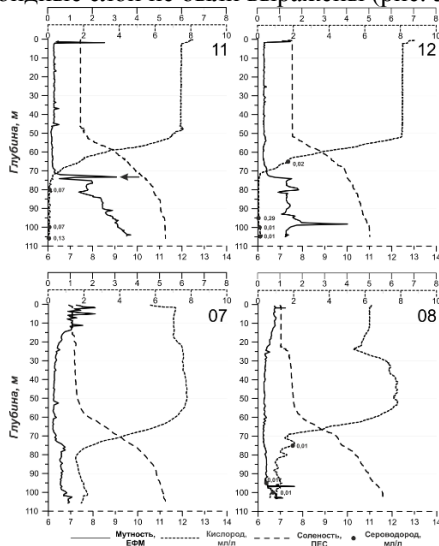


Рис. 3. Изменение гидрологических и гидрохимических параметров в восточной Готландской впадине в ноябре (11) и декабре (12) 2023 г. и июле (07) и августе (08) 2024 г. Стрелкой отмечен нефелоидный слой хемогенного происхождения. Черными точками на кривой кислорода нанесены значения сероводорода на глубинах его отбора.

Таким образом, привлечение данных по содержанию растворенного кислорода к интерпретации данных по мутности вод позволило выявлять потенциальную возможность существования хемогенных нефелоидных слоёв, эпизодически возникающих на редокс-барьере в глубинных водах Балтийского моря. Для полной идентификации таких скоплений взвеси необходимо получать ее пробы с дискретностью не хуже полуметра, и определять в них содержание гидроокислов железа и марганца.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальных научных установок ПС «Академик Иоффе» и НИС «Академик Борис Петров» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou Y., Gong H., Zhou F. Responses of horizontally expanding oceanic oxygen minimum zones to climate change based on observations// *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49(6). P. 1–11.
2. Holtermann P., Prien R., Naumann M., Umlauf L. Interleaving of oxygenized intrusions into the Baltic Sea redoxcline // *Limnology and Oceanography*. 2020. V. 65(3). P. 482–503.
3. Brewer P.G., Spenser D.W. Distribution on some trace elements in Black Sea and their flux between dissolved and particulate phases // *The Black Sea: Geology, Chemistry and Biology*. Tulsa (Okla), 1974. P. 137–143.
4. Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 416 с.
5. Emelyanov E.M. Geochemistry of suspended matter and bottom sediments of the Gdansk Basin and processes of sedimentation // *Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea*, Kaliningrad: Yantarny skaz, 2002. P. 220–302.
6. Сивков В.В., Журов Ю.И. О специфике скоплений взвеси во впадинах Балтийского моря // *Океанология*. 1991. Т. 31. № 6. С. 1060–1066.
7. Современные методы гидрохимических исследований океана / Бордовский О.К., Чернякова А.М. (отв. ред.). М.: ИО РАН, 1992. 199 с.
8. Golenko M., Paka V., Zhurbas V. et al. Intermediate plumes of low oxygen in the southeastern Baltic Sea // *Oceanologia*. 2023. V. 65(1). P. 100–116.
9. Бубнова Е.С., Ефимова К.А., Сивков В.В. Гипоксия и аноксия в Гданьской впадине Балтийского моря в 2021–2023 гг. // *Океанологические исследования*. 2024. Т. 52. № 2. С. 58–71. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).4

The vertical distribution of suspended matter from November 2023 to August 2024 was studied at two key locations: the Gdansk Basin and the slope of the Gotland Basin. In both basins, intermediate chemogenic nepheloid layers were only recorded in November 2023, suggesting an episodic process of their formation on the redox-barrier.

Скроб П.В.¹, Алексеева Т.Н.², Медведков А.А.^{1,3}

(¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: fgeোকologia@yandex.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ³Институт географии РАН, г. Москва)

Гранулометрический состав поверхностных отложений

Западного Аралкума: геоэкологический анализ

Skrob P.V.¹, Alekseeva T.N.², Medvedkov A.A.^{1,3}

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³Institute of Geography RAS, Moscow)

Granulometric composition of surface sediments of the Western Aralkum: geoeological analysis

Ключевые слова: гранулометрический спектр, эоловая денудация, дефляция, микрочастицы, дальний перенос, экологические последствия, Аральский регион

Выполнен гранулометрический анализ отложений участка Западного Аралкума. Проанализирован полученный спектр частиц, размер которых индицирует время перехода осушенной поверхности к автоморфизму. Выявлено, что мельчайшие частицы, наиболее подверженные эоловой денудации и дальнему переносу, составляют наименьшую долю среди отложений, сформировавшихся в первые фазы регрессии Аральского моря. Мелкий алеврит и пелит, сформировавшиеся в период антропогенно-обусловленной регрессии Аральского моря, определяют современный характер экзогенной динамики пустыни Аралкум.

Введение. К настоящему моменту одним из главных результатов регрессии Аральского моря является продолжающаяся трансформация обширного автоморфного природного комплекса – пустыни Аралкум [1]. Составляющие пустыню сопряженные геосистемы (и их компоненты) низких рангов отличаются неоднородностью, в т.ч. гранулометрической. Подобные неоднородности – результат в т.ч. эоловой аккумуляционной и денудационной активности, свойственной Центральнo-Азиатскому (Туранскому) региону в целом, и являются следствием макроклиматических процессов [2, 3]. Важно отметить, что гранулометрический состав поверхностных отложений Аралкума также (т.е. наряду с циркуляционными процессами) является фактором, определяющим зону влияния осушенной поверхности, которая за счет дальнего переноса простирается и на малонарушенные территории России, являющиеся экологическим буфером Северной Евразии [4, 5].

В ходе экспедиции под руководством чл.-корр. РАН П. О. Завьялова, состоявшейся в мае 2019 г. и проходившей в пределах западного Аралкума (близ чинка плато Устюрт), были отобраны образцы поверхностных отложений (рис. 1). Позднее, в 2023 г. был выполнен гранулометрический анализ, позволивший получить данные о зависимости гранулометрического спектра участков от стадии их эволюционного развития в период

современной регрессии Аральского моря (т.е. последовательного перехода осушенных участков к автоморфизму).

Материалы и методы исследования. Пробоотбор поверхностных отложений (рис. 1) выполнялся в ходе экспедиции (май 2019 г.) вдоль направления регрессии моря. Участок расположен в западной части Аралкума на территории республики Узбекистан (Муйнакский район). В геоморфологическом отношении данная территория представлена слабонаклонной равниной, которую с запада обрамляют склоны плато Устюрт. Общее количество образцов – 6 шт. (рис. 1), исследуемый участок соответствует следующему временному интервалу регрессии Аральского моря (с 1975 по 2008 г.) с постепенным снижением уреза воды с отметки +49 м. до +27 м.

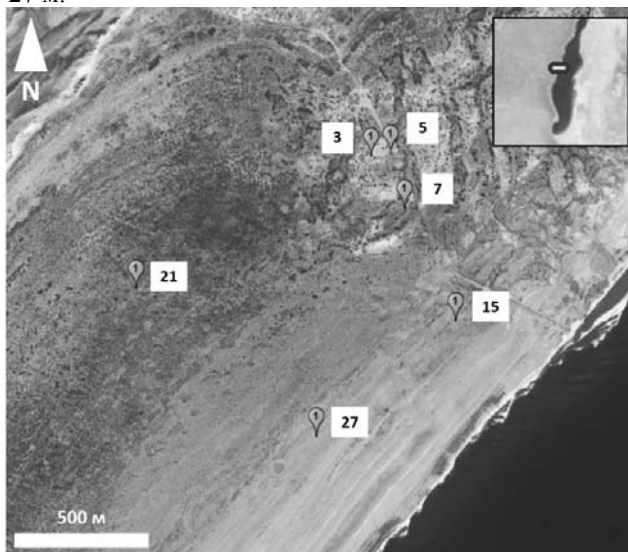


Рис. 1. Область пробоотбора на западном побережье Аральского моря (с указанием точек, в которых производился отбор проб в 2019 г.).

Гранулометрический анализ выполнялся в лаборатории физико-геологических исследований им. А.П. Лисицына ИО РАН с использованием водно-механического метода Петелина, базирующегося на законе Стокса [6]. Предварительная подготовка сухих навесок исходных образцов ($m \approx 20$ г) включала обработку триполифосфатом натрия (диспергатор), термическую обработку (кипячение) и последующую фильтрацию для отделения частиц размерностью менее 0.01 мм. Для частиц крупнее 0.01 мм после высушивания проводилось просеивание для получения масс отложений следующих классов крупности: 7–10 мм, 5–7 мм, 3–5 мм, 2–3 мм, 1–2 мм, 0.5–1 мм, 0.25–0.5 мм, 0.1–0.25 мм, 0.05–0.1 мм, 0.01–0.05 мм.

Для частиц менее 0.01 мм определена суммарная аликвота. В результате пересчета на общий объем дисперсного раствора определена абсолютная масса частиц мельчайшей фракции (мелкий алеврит и пелит), а также их долевое соотношение в сравнении с частицами другого размера. Таким образом, для каждой точки пробоотбора получен гранулометрический спектр по 11 классам крупности.

Результаты исследования. Анализ гранулометрических спектров позволяет выявить следующую зависимость: поверхностные отложения, маркирующие участки бывшего морского дна на более поздних стадиях регрессии, отличаются большей долей пелитов и мелкого алеврита (>0.01 мм). Так, на точках пробоотбора (рис. 1) под №№ 7, 15 и 27, доля этих мельчайших фракций составляет, соответственно, 58/7%, 46/2% и 63/9%. Наоборот, доля более крупных фракций преобладает на тех участках, которые раньше перешли к автоморфной фазе эволюционного развития (точки под №№ 3 и 5). Подобная закономерность в значительной степени может быть связана с постоянной активностью денудационных процессов и высокой подверженности несцепленных мельчайших частиц дефляционному переносу. Так, для различных природных комплексов свойственны специфичные формы рельефа, свидетельствующие о дефляционном характере обработки поверхностных отложений, например, песчаные образования (дюны) [7]. Причем степень трансформации поверхности и наличие или отсутствие тех или иных специфических природных комплексов определяется и водным режимом. Так, влиянию денудационных процессов практически не подвержены солончаки первых лет регрессии моря (отличаются сильным засолением верхних горизонтов почвы, плотной коркой с поверхности и близко расположенным уровнем грунтовых вод [7]).

Подобные свойства осушенной поверхности, на которой формируются современные ландшафты пустыни Аралкум, определяют геоэкологическую специфику территории и зону ее влияния [5]. Осушенное дно Аральского моря – активный источник соле- и пылепереноса [8, 9] со значительной по размерам площадью его потенциального влияния (рис. 2). Динамика дальнего переноса имеет выраженную сезонность, которая определяется характером функционирования центров действия атмосферы в Евразии (в целом) и в Центральной Азии (в частности) [10].

Расчет траекторий движения воздушных масс (2024 г., модель NOAA HYSPLIT [11]) показывает предполагаемую область распространения и диффузии частиц, слагающих поверхность Аралкума (рис. 2). Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что траектории движения воздушных масс и по-видимому, массоперенос частиц, охватывают значительную часть Северной Евразии. Плотность потенциальной диффузии также неоднородна, данный показатель рассчитан как количество траекторий воздушных масс на единицу площади. Определено, что на территории

России максимальная плотность траекторий (в рамках указанного в подрисуночной подписи временного интервала) характерна для юга Западной Сибири. Параметр плотности предполагает выявление районов наибольшей диффузии (осаждения) частиц, что в дальнейшем может стать основой для количественной оценки влияния Аралкума на прилегающие (в т.ч. малонарушенные) территории.

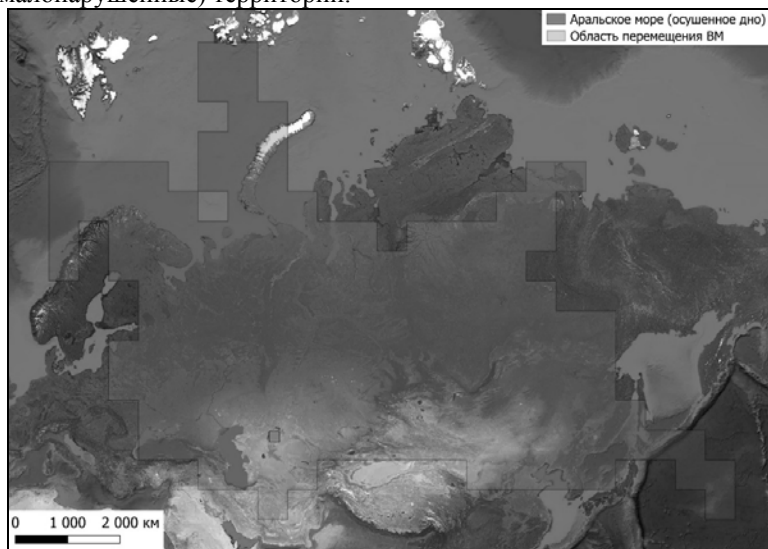


Рис. 2. Моделирование области потенциальной диффузии микрочастиц при их перемещении воздушными массами из Аральского региона (2024 г., интервал – 120 часов, модель NOAA HYSPLIT).

Выводы. Природные комплексы пустыни Аралкум, возникшей на месте регрессирующего Аральского моря, отличаются неоднородностью гранулометрических спектров. Эта неоднородность обусловлена постепенной регрессией морских вод и последующей обработкой осушенной поверхности процессами золовой денудацией. Выявлено, что поверхностные отложения участков, раньше вступивших в регрессионный этап развития, содержат в своем спектре меньшее количество пелитов и мелких алевроитов – частиц, участвующих в дальнем переносе веществ (в т.ч. загрязняющих). Расчет траекторий движения воздушных масс позволяет говорить о том, что область экологического влияния Аралкума далеко выходит за пределы Центральной Азии, распространяясь на значительные на размеры территории Северной Евразии.

За предоставленную возможность работы с образцами, отобранными в экспедиции, авторы выражают благодарность следующим сотрудникам ИО

РАН: врио директора, к.г.-м.н. В.П. Шевченко и зав. лаб., чл.-корр. РАН П.О. Завьялову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазовский Н.Ф. Аральский кризис: причины возникновения и пути выхода. М.: Наука, 1990. 134 с.
2. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 246 с.
3. Золотокрылин А.Н. Глобальное потепление, опустынивание/деградация и засухи в аридных регионах // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 1. С. 3–13. DOI: 10.31857/S2587-5566201913-13
4. Ge Y., Abuduwaili J., Ma L., Liu D. Temporal Variability and Potential Diffusion Characteristics of Dust Aerosol Originating from the Aral Sea Basin, Central Asia // Water Air Soil Pollut. 2016. V. 227 (2): 1-12 p. DOI: 10.1007/s11270-016-2758-6
5. Медведков А.А. Геоэкологические проблемы в контексте климатических изменений // Известия РАН. Серия географическая. 2024. Т. 88. № 3. С. 263–280. DOI: 10.31857/S2587556624030011
6. Свальнон В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
7. Мониторинг осушенного дна Аральского моря / Под ред. Духовного В.А., Стулиной Г.В., Кенжабаева Ш.М. Ташкент: 2020. 254 с.
8. Новикова Н.М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 1. Развитие Аральской проблемы, её изучение, оценка и разработка мероприятий // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 5–66. DOI: 10.24411/2542-2006-2019-10026
9. Новикова Н.М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 2. Исследование динамики климата и изменений обсохшего дна моря // Экосистемы: экология и динамика. 2020. Т. 4. №2. С. 96–170. DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10062
10. Wang W., Samat A., Abuduwaili J. et al. Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region // Atmospheric Research. 2022. V. 275. 106242. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106242
11. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // Bulletin of the American Meteorological Society. 2016. V. 96 (12). 150504130527006. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1

It was obtained a spectrum of surface sediments indicated the stage of sea's draining as a result of granulometric analysis in Western Aralkum. It was found that smallest parts are more vulnerable to Aeolian long-range transport. In addition, surface deposits of the first stage of Aral Sea's anthropogenic regression contain a small amount of these particles. In fact, smallest parts are the reason for Aeolian dynamics in the modern Aralkum desert.

Тармёнок Е.О., Таловская А.В.

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: ekatar1328@gmail.com)

Геохимическая характеристика снегового покрова в районе расположения глиноземного производства

Tarmyonok E.O., Talovskaya A.V.

(National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk)

Geochemical characteristics of snow cover in the alumina refinery area

Ключевые слова: твердый осадок снега, снеготалая вода, элементный состав, минеральный состав.

В рамках данного исследования определен уровень и характер распределения пылевой нагрузки, минералого-геохимическая специфика состава твердого осадка снегового покрова и гидрохимические особенности снеготалой воды в окрестностях глиноземного производства.

Глинозем играет ключевую роль в производстве алюминия, который является одним из наиболее востребованных металлов в мировой металлургической отрасли. За рубежом практически весь алюминий получают из бокситовых руд. По официальным данным, в России 41% от всего поставляемого глинозема на отечественные алюминиевые заводы производится из нефелиновых руд. Оценка влияния глиноземного производства на состояние окружающей среды является одной из актуальных геоэкологических задач.

В настоящее время многими исследователями выполняется оценка эколого-геохимического состояния урбанизированных и фоновых территорий с использованием снегового покрова. Снеговой покров представляет собой планшет-накопитель атмосферных частиц, что делает его удобным инструментом для изучения их состава и дальности распространения от источников загрязнения.

Целью данной работы является выявление уровней пылевой нагрузки, накопления химических элементов и определение типов техногенных образований в снеговом покрове в районе расположения глиноземного производства, использующего нефелиновые руды.

Отбор и подготовка проб снегового покрова осуществлялся по стандартной методике [1–2] и с учетом опыта снегогеохимических исследований в Сибири [3–4]. Пункты наблюдения располагали с учетом главенствующего направления ветра на расстоянии до 10 км в пяти направлениях от крупных источников глиноземного производства. По результатам подготовки проб получены снеготалая вода и твёрдый осадок снега. В НОЦ «Вода» ТПУ состав проб снеготалой воды изучался методом

ионной хроматографии, потенциометрическим и титриметрическим методами. Общая жесткость проб снеготалой воды определялась расчетным методом. Элементный состав проб определялся с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. В лабораториях учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т ТПУ элементный состав твердого осадка снега исследовали с применением инструментального нейтронно-активационного анализа. В лабораториях МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ анализ минерально-вещественного состава твердого осадка снега произведен электронной сканирующей микроскопией и рентгенофазовым методом, содержание ртути – атомно-абсорбционной спектрометрией.

Для обработки данных химического анализа снеготалой воды использована формула Курлова [5]. Также полученные данные сравнивались с фоновыми значениями [3], с кларком речных вод [6], составом атмосферных осадков бассейна Средней Оби [7]. Для твердого осадка снега были рассчитаны следующие эколого-геохимические показатели: пылевая нагрузка, коэффициенты концентрации (Кс) относительно данных для 3-х фоновых районов: 40 км на север от предприятия (данные автора); 3 км на северо-запад от предприятия (данные автора); для юга Западной Сибири [8]. По полученным значениям коэффициентов концентрации рассчитывается суммарный показатель загрязнения (Zс).

Результаты анализа химического состава снеготалой воды в районе глиноземного комбината с его теплоэлектростанцией показали ее отличие от фоновых показателей (таблица). В районе исследования снеготалая вода характеризуется гидрокарбонатным, натриево-кальциево-калиевым составом, является умеренно пресной и очень мягкой. Для снеготалой воды определен слабощелочной характер атмосферных осадков в отличие от фоновых показателей.

Таблица. Формула Курлова, построенная для снеготалых вод в окрестностях глиноземного комбината и фоновом районе

Район	Формула Курлова
Глиноземный комбинат	$M_{0,2} \frac{HCO_3^- + SO_4^{2-}}{Ca + Mg} \cdot pH^{7,9}$
Фон (40 км) *	$M_{0,02} \frac{HCO_3^- + SO_4^{2-}}{Ca + Mg} \cdot pH^7$

Примечание: * – данные для расчёта формулы Курлова в фоновом районе из публикации [3]

За пределами изучаемого объекта в снеготалой воде наблюдается снижение концентрации CO_3^{2-} с 19.2 до 1 мг/л, HCO_3^- – с 105 до 78 мг/л, Na^+

– с 35 до 8.9 мг/л, K^+ – с 20.7 до 5.2 мг/л. Концентрация ионов кальция в пробах находится на уровне 14.8–17.2 мг/л. Содержание изучаемых компонентов в снеготалой воде выше фона [3] более, чем в 2 раза. В пробах Na, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, As, La, Ce, характеризуются повышенными концентрациями относительно кларка речных вод, а Mg и Ca – относительно атмосферных осадков бассейна Средней Оби.

Прослеживается одинаковый характер распределения уровня пылевой нагрузки в течении мониторинга. На расстоянии 1–2 км приходится максимальное выпадение пыли в снеговой покров, где формируется очень высокий уровень загрязнения относительно фона [4], далее за пределами комбината на расстоянии от 2 до 8 км происходит снижение пылевой нагрузки до 30 раз и снижение уровня загрязнения до низкого (рис. 1).

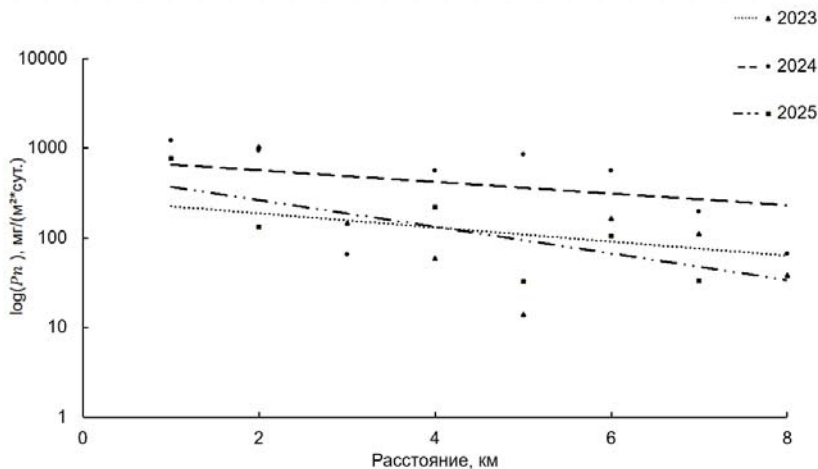


Рис. 1. Распределение уровня пылевой нагрузки по мере удаления от глиноземного комбината (2023–2025 гг.)

В твердом осадке снега установлены следующие средние значения коэффициента концентрации (K_c) и суммарного показателя загрязнения (Z_c) относительно фона 40 км на север от предприятия – Ca ($K_c > 3$), Na, Br, Ce, Sr, Eu ($K_c > 1.5$), при этом, формируется низкий уровень загрязнения ($Z_c = 8$); относительно фона 3 км на северо-запад – только для Ta, Hg, Br ($K_c > 10$), Cs ($K_c > 1.5$), ($Z_c = 60$) – низкий уровень загрязнения; относительно фона для Западной Сибири – Ca, Sr ($K_c > 10$), Na, U, Tb, Ba, Yb ($K_c > 5$), La, Sm ($K_c > 3$), Ce, Fe ($K_c > 1.5$), формирующие средний уровень загрязнения ($Z_c = 77$) (рис. 2).

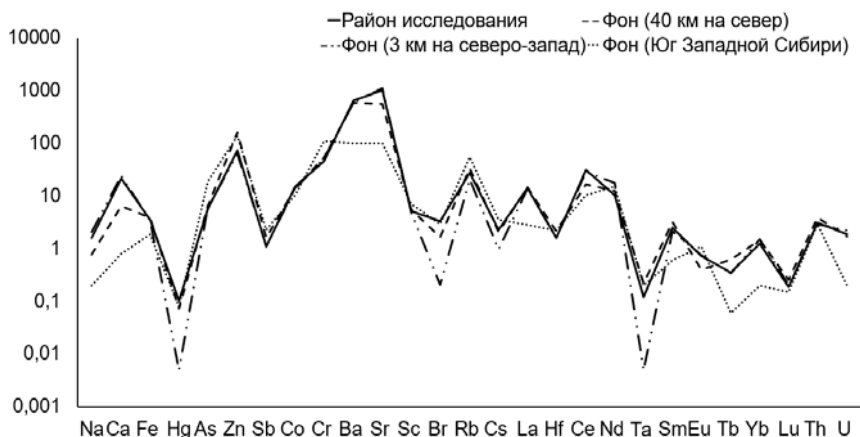


Рис. 2. Среднее содержание химических элементов в твердом осадке снега в районе расположения глиноземного производства (мг/кг; фон для юга Западной Сибири [8])

По результатам кластерного анализа по наивысшим мерам сходства парных коэффициентов корреляции Пирсона r пробы твердого осадка снега были объединены в группы по схожему элементному составу и выявлены отдельные ассоциации химических элементов: U-Sm-Sr ($r = 0.37-0.42$); Ce-Th-La-Ba-Lu-Yb-Hf-Co-Fe ($r = 0.1-0.25$), Ta-Cr-Sc ($r = 0.3-0.49$); Sb-Na ($r = 0.52$).

В ходе анализа минерального состава твердого осадка снега обнаружены в небольших количествах такие минералы как кварц (SiO_2) (15%), альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) (10%), магнезит (MgCO_3) (6.1%). В пробах также выявлены кальцит (CaCO_3) (65.6%), нефелин ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}$) (13.3%) и афтиталит ($(\text{K},\text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$) (2.3%), характерные для промышленной пыли и сырьевых материалов [9]. В пробах обнаружены техногенные частицы угля и микросферы различного состава (алюмосиликатные, алюмосиликатно-кальциевые, железосодержащие и алюмосиликатные с примесями бария и стронция). Определен низкий уровень загрязнения территории города по соотношению минеральных (69%) и техногенных образований (31%), согласно градации [4]. По градации отношения минерал-индикатор/кварц [4], в радиусе от 1 до 2 км от производства определен очень высокий уровень обогащения твердого осадка снега кальцитом (14 ед.) и нефелином (4.2 ед.), средний уровень – афтиталитом (0.6 ед.) относительно доли кварца. В радиусе от 2 до 6 км, в районе жилой застройки, уровень обогащения кальцитом твердого осадка снега значительно снижается за счёт увеличения доли кварца.

Таким образом, в ходе данного исследования установлена динамика пылевой нагрузки в течение трех лет наблюдений, определено процентное содержание минеральных образований, выявлена геохимическая специфика снеготалой воды и твёрдого осадка снега в районе размещения глиноземного производства, использующего нефелиновые руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
2. Ревич Б.А., Сает Ю.Е., Смирнова Р.С. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: Министерство здравоохранения СССР, 1990. 17 с.
3. Шахова Т.С. Влияние нефтеперерабатывающих заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий по данным изучения снегового покрова (на примере гг. Омск, Ачинск, Павлодар). Дис. ... кандидат г.-м. наук. Томск, 2018. 192 с.
4. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова). Дис. ... д-ра г.-м. наук. Томск, 2022. 373 с.
5. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 46 с.
6. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. Наука, 1967. 215 с.
7. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 1. С. 63–70.
8. Шатилов А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна. Автореферат дис. ... кандидат г.-м. наук. Томск, 2001. 24 с.
9. Кирюшин Е.В. Разработка технологий для снижения выбросов загрязняющих веществ от печей спекания и оценка их экологической эффективности. Дис. ... канд. тех. наук. Красноярск, 2022. 165 с.

This study determined the level and nature of dust load distribution, the mineralogical and geochemical characteristics of the composition of solid snow cover deposits, and the hydrochemical characteristics of snowmelt water in the vicinity of alumina production facilities.

Шевченко В.П.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: vshevch@ocean.ru)

Тридцать пять лет исследований влияния рассеянного осадочного вещества атмосферы на условия среды и морское осадконакопление в Арктике

Shevchenko V.P.

(Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow)

Thirty-five years of studies of the influence of atmospheric dispersed sedimentary matter on environmental conditions and marine sedimentation in the Arctic

Ключевые слова: рассеянное осадочное вещество атмосферы, аэрозоли, атмосферный перенос, природные архивы, черный углерод, осадконакопление

Обобщены результаты исследований рассеянного осадочного вещества в атмосфере, Арктики, выполненных сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН совместно с коллегами из ряда российских и зарубежных институтов в течение прошедших 35 лет. Показано, что рассеянное осадочное вещество атмосферы оказывает существенное влияние на окружающую среду и изменение климата в Арктике и играет важную роль в процессах осадконакопления.

Арктика оказывает огромное влияние на природную среду Земли. Очень хрупкое равновесие между ее физическими, химическими и экологическими параметрами делает Арктику индикатором глобальных изменений [1–3]. Важным направлением исследования экосистемы Арктики и ее изменений является изучение распределения, состава и переноса рассеянного осадочного вещества атмосферы, так как перенос многих вредных примесей осуществляется в форме мельчайших (мельче 10 мкм) частиц (микро- и наночастиц). Данные о микро- и наночастицах атмосферы необходимы для правильной оценки особенностей современного осадконакопления, путей переноса и накопления загрязнений, изменений климата [4].

Изучение состава аэрозолей приповерхностного слоя атмосферы над морями Российской Арктики было начато нами под руководством академика А.П. Лисицына в 1991 г. в международной экспедиции SPASIBA-91 [5]. В дальнейшем эти исследования были продолжены в рейсах на научно-исследовательских судах Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и ряда других организаций, включая германский научно-исследовательский ледокол «Полярштерн», и в прибрежных экспедициях (на побережье Белого моря) совместно с коллегами из Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Лимнологического института СО РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова,

ФИЦКИА УрО РАН, Томского государственного университета, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Norwegian Institute for Air Research (NILU), Geosciences Environment Toulouse [6–15].

В экспедициях сотрудники Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для определения элементного состава аэрозолей фильтрацию воздуха проводили через фильтры АФА-ХА. Для изучения минерального и вещественного состава рассеянного осадочного вещества атмосферы материала, собранного на фильтрах, оказывается недостаточно, а собранный материал засорён кристаллами морской соли. Поэтому параллельно с фильтрацией использовали метод сбора большого количества нерастворимых в воде аэрозолей нейлоновыми сетями [16]. В экспедициях изучали гранулометрический состав аэрозолей (распределение частиц по размерам), их вещественный, минеральный, элементный состав, в том числе концентрации элементного (черного) и органического углерода. Более подробно методы исследований описаны в работах [6, 12, 14, 15].

На основании геохимических исследований и изучения загрязнений арктической атмосферы удалось выявить главные точечные и локальные источники загрязнений (промышленные центры Западной Европы и Северной Америки, Норильск, Кольский п-ов, нефтяные факелы Западной Сибири и северо-востока Европейской части России). Удалось по соотношениям элементов установить "лицо" загрязнений из каждого источника (из крупнейших промышленных областей), проследить конкретные траектории происхождения воздушных масс в Арктике и связанных с ними конкретных загрязнений, места главной разгрузки воздушных масс (депоцентры), сезонный ход процессов.

В целом, содержание большинства химических элементов (Na, Al, K, Ca, Sc, Fe, Co, Rb, Zr, Cs, Ba, РЗЭ, Hf, Ta, Th, U) в нерастворимой фракции аэрозолей ниже средних значений для верхней части континентальной земной коры [6]. Наиболее вероятный источник этих элементов – почвы севера Евразии. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, Cd, Pb значительно выше их среднего для земной коры, их основной источник – антропогенный. Наиболее существенные источники загрязнения аэрозолей Российской Арктики – горно-металлургические комбинаты Кольского п-ова, Урала и Норильска, зимой ощущается влияние дальнего переноса из расположенных южнее регионов [17].

Учитывая значительное обогащение олового осадочного вещества Pb, Sb, Cd, V, можно предположить, что для этих элементов оловый путь является основным путём их поступления в донные осадки арктических морей [12, 18].

Показано, что для пространственного распределения черного (сажевого) углерода в приводном слое атмосферы Северной Атлантики и Евразийской Арктики характерно то, что его концентрации уменьшаются в северном направлении и с увеличением расстояния от континента: от нескольких

сотен нг/м^3 в южной части Северного моря до значений ниже 50 нг/м^3 в полярных широтах, значительно возрастающая при поступлении воздушных масс из районов сжигания попутного газа на нефтегазовых месторождениях и лесных пожаров [7, 8, 10, 14].

Таким образом, показано, что рассеянное осадочное вещество атмосферы влияния на окружающую среду и климатические изменения, играет важную роль в процессах морского осадконакопления.

Автор благодарен всем коллегам, с которыми участвовал в исследовании рассеянного осадочного вещества атмосферы Арктики. Обобщение результатов многолетних исследований выполнено в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bienfang P.K., Ziemann D.A. The role of coastal high latitude ecosystems in global export production // Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea. New York: Plenum Press, 1992. P. 285–297.
2. Лисицын А.П. Нерешенные проблемы океанологии Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001. С. 31–75.
3. Матишов Г.Г. Исследование Арктической зоны Заполярья России (издание приурочено к 300-летию Российской академии наук). М.: РАН, 2023. 230 с.
4. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Отв. ред. Л.И. Лобковский, Р.И. Нигматулин. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
5. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Kuptzov V.M. et al. Composition of aerosols over the Laptev, Kara, Barents, Greenland and Norwegian seas // Berichte zur Polarforschung. 1995. V. 176. P. 7–16.
6. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А. и др. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
7. Полькин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В. и др. Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 836–840.
8. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S. et al. Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. № 17. P. 8833–8855.
9. Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Сивонен В.П., Сивонен В.В. Вещественный и элементный состав приземного аэрозоля северо-западного побережья Кандалакшского залива Белого моря // Оптика атмосферы и

океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 488–492.

10. Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М. и др. Результаты исследований характеристик аэрозоля в атмосфере Карского и Баренцева морей в летне-осенний период 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 5. С. 391–402.

11. Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н. и др. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 6. С. 421–429.

12. Шевченко В.П., Голобокова Л.П., Сакерин С.М. и др. Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем // Система Баренцева моря / под ред. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 127–142.

13. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Голобокова Л.П. и др. Тридцать лет исследований рассеянного осадочного вещества в атмосфере Арктики // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. М.: ИО РАН, 2022. С. 179–183.

14. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kopeikin V.M. et al. Spatial distribution of atmospheric black carbon in the Eurasian sector of the Arctic Ocean from 28 marine expeditions (2007–2022) // Atmospheric Pollution Research. 2023. V. 14. Article 101885. doi:10.1016/j.apr.2023.101885.

15. Сакерин С.М., Польшкин В.В., Голобокова Л.П. и др. Статистическое обобщение химического состава атмосферного аэрозоля над морями Евразийского сектора Северного Ледовитого океана // Океанология. 2024. Т. 64. № 6. С. 911–922.

16. Chester R., Johnson L.R. Atmospheric dust collected off the West African coast // Nature. 1971. V. 229. P. 105–107.

17. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос тяжелых металлов в районы севера европейской территории России // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 108–116.

18. Kadko D., Galfond B., Landing W.M., Shelley R.U. Determining the pathways, fate, and flux of atmospherically derived trace elements in the Arctic ocean/ice system // Marine Chemistry. 2016. Т. 182. P. 38–50.

This report summarizes the results of studies of atmospheric dispersed sedimentary matter in the Arctic conducted by researchers at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, together with colleagues from several Russian and foreign institutes, over the past 35 years. It demonstrates that atmospheric dispersed sedimentary matter has a significant impact on the environment and climate change in the Arctic and plays a key role in sedimentation processes.

**Шишкина А.Д.¹, Новигатский А.Н.², Смирнов И.А.³,
Терновой Д.А.^{2,4}, Калашникова Я.И.⁴, Саввичев А.С.^{5,1}**

(¹ГБОУ Школа № 1553 имени В.И. Вернадского, Москва, e-mail:

alshishkina33@1553.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: novigatsky@ocean.ru; ³АНОО Гимназия Святителя Василия Великого, Московская обл.; ⁴ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», Москва; ⁵Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва)

Состав криозоля поверхности Антарктического ледяного щита оазиса Ширмахера, ст. Новолазаревская

**Shishkina A.D.¹, Novigatsky A.N.², Smirnov I.A.³,
Ternovoy D.A.^{2,4}, Kalashnikova Y.I.⁴, Savvichev A.S.^{5,1}**

(¹State Budgetary Educational Institution School № 1553 V.I. Vernadsky, Moscow;

²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³St. Basil the Great Gymnasium, Moscow Region; ⁴Russian Biotechnological University, Moscow; ⁵Winogradsky Institute of Microbiology of the Federal Research Centre “Fundamentals of Biotechnology” of the RAS, Moscow)

Composition of cryosol from the surface of the Antarctic ice sheet at the Schirmacher Oasis, Novolazarevskaya station

Ключевые слова: Антарктический ледяной щит, оазис Ширмахера, криозоль

Представлены результаты исследований 2024 г. криозолей (нерастворимых частиц) ледяного керна (0–90 см) поверхности Антарктического ледяного щита оазиса Ширмахера. По вертикали ледяного керна биологические и минеральные объекты локализуются неравномерно, это связано с периодами потепления и похолодания в Антарктиде за последние 100 лет.

Введение. В связи с чутким откликом полярных экосистем на изменения климата Земли, в настоящее время стали особенно актуальны исследования состава нерастворимых микрочастиц ледяного покрова Антарктиды. На Антарктический ледяной щит постоянно совершается воздушный занос большого количества олового материала, в том числе клеток микроорганизмов, которые обнаруживаются методом микроскопии и посева [1]. Кроме того, ледяной покров, является идеальным природным планшетом для сбора и выявления микрочастиц космической пыли [2]. С конца XIX века, накоплен большой материал о различных группах микроорганизмов в воздухе, грунтах-почвах и снежно-ледяном покрове Антарктиды, где в микробном населении представлены почти все крупные современные группы микроорганизмов: неспорообразующие и спорообразующие бактерии, кокки, микобактерии, актиномицеты, миксобактерии, дрожжи микроскопические мицелиальные грибы и др. [1]. Установлена корреляция распределения микрочастиц пыли и микроорганизмов по горизонтам в соответствии с климатическими

условиями, существовавшими в периоды формирования различных слоев Антарктического ледника [2]. За последние 150 лет инструментальных наблюдений обнаружена значимая положительная связь между температурой воздуха и скоростью снегонакопления Центральной Антарктики: чем выше температура, тем больше аккумуляция снега [2]. Целью настоящей работы является сопоставление состава нерастворимых частиц поверхностного керна Антарктического ледяного щита в оазисе Ширмахера с климатическими условиями периода его формирования.

Материалы и методы. В рамках «Московской Молодежной Антарктической Экспедиции – 2024», организованной Департаментом образования и науки города Москвы, отрядом «Антарктическая наука» был отобран ледяной керн (0–90 см) поверхности Антарктического ледяного щита в оазисе Ширмахера недалеко от ст. Новолазаревская. Ледяной керн был разделен на три равных части (0–30, 30–60, 60–90 см) растоплен при +20°C и профильтрован на лавсановые ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм с помощью установки мембранной ультрафильтрации Sartorius. Кроме того, был отобран свежий снег, выпавший в 2024 г., и фирнообразный прошлогодний снег 2023 г., которые были также растоплены и обработаны с помощью мембранной ультрафильтрации [3]. Полученные пять лавсановых фильтров были проанализированы на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA–3 с микрозондовой приставкой INCA MAX50 в Аналитической лаборатории ИО РАН для определения состава нерастворимых частиц.

Результаты и обсуждение. При просмотре проб под сканирующим электронным микроскопом проведена первичная идентификация объектов на биогенные и литогенные с использованием справочной литературы [1]. В результате определены биологические объекты и литогенные минералы, подсчитано их количество и рассчитано соотношение в процентах каждой пробы (таблица).

Таблица. Результаты определения нерастворимых частиц в пробах поверхности снега и фирна Антарктического ледяного щита по данным СЭМ TESCAN VEGA–3.

Пробы	Возраст расчетный*	Биогенные объекты							Остатки мхов и лишайников	Литогенные объекты		Соотношение, %		
		Грибы			Бактерии			Водоросли		Минералы	Косм.пыль	Биогенные	Литогенные	
		Дрожжи	Мицелиальные	Споры	Спорообраз-щие	Неспорообраз-щие	Споры	Споры						
Снег свежий	2024 г.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2	2	7	17	1	40	60	
Снег фирнообразный	2023 г.	1	н.о.	н.о.	н.о.	2	н.о.	3	4	30	1	25	75	
Фирн 0-30 см	2022-1983 г.	2	н.о.	3	8	5	3	2	5	51	н.о.	35	65	
Фирн 30-60 см	1982-1944 г.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	4	7	н.о.	35	65	
Фирн 60-90 см	1943-1905 г.	н.о.	н.о.	2	7	6	2	н.о.	8	38	н.о.	40	60	
*Нарастание Антарктического ледяного щита 1,3 см в год по Котляков и др., 2017														

*Нарастание Антарктического ледяного щита 1,3 см в год по Котляков и др., 2017

Учитывая данные среднего нарастания Антарктического ледяного щита 1.3 см в год [2], был рассчитан приблизительный возраст полученного керна

(таблица). На всем протяжении вертикального снежно-ледяного (фирна) разреза преобладали минеральные зерна габбро-диоритового состава кристаллических пород докембрийского возраста оазиса Ширмахера (таблица). Биологические объекты представлены: грибами (дрожжи, споры грибов), бактерии (спорообразующие и их споры, неспорообразующие), фрагментами водорослей динофлагеллят, спорами водорослей, остатками растительности мхов и лишайников (рис. 1).

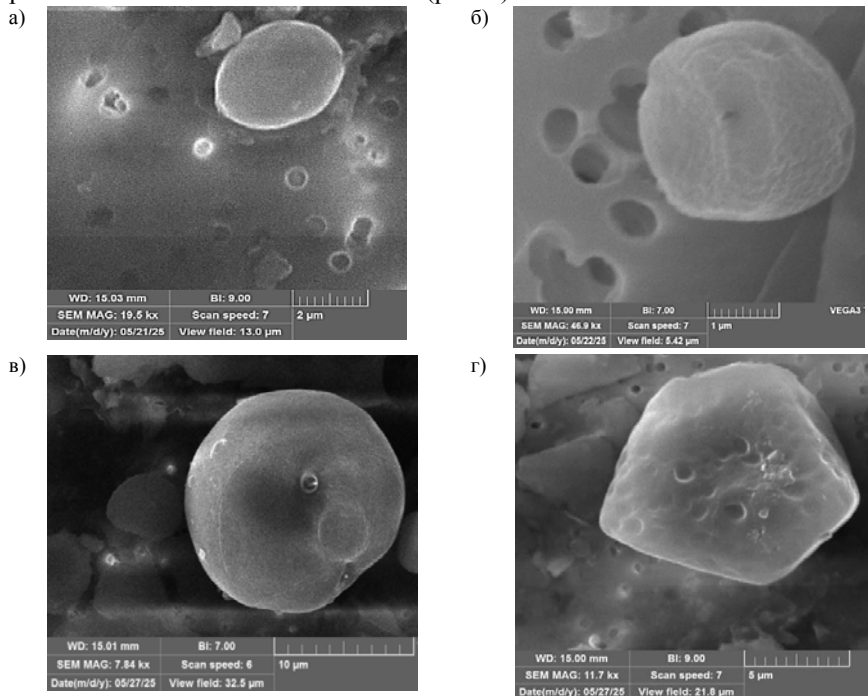


Рис. 1. Криозоли в пробах поверхности снега и фирна Антарктического ледяного щита, обнаруженные с помощью СЭМ TESCAN VEGA-3: а) спора бактерии в «Снег свежий»; б) неспорообразующие бактерии в «Снег фирнообразный»; в) дрожжи в «Фирн 0–30 см»; г) динофлагелляты в «Фирн 0–30 см».

В целом из-за сурового термического режима отсутствия жидких осадков, низкой влажности воздуха, частых и сильных ветров на поверхности Антарктического ледяного щита создаются условия крайне неблагоприятные для развития биологического разнообразия. Больше всего биологических (от 2 до 20 мкм, рис. 1) и литогенных объектов было обнаружено в пробе «Фирн 0–30 см» время накопления которой приблизительно соответствует интервалу 2022–1983 гг., при среднем

снегонакоплении 1.3 см в год [2]. Следующая по количеству объектов выделяется проба «Фирн 60–90 см», время накопления которой примерно соответствует интервалу 1943–1905 гг. Меньше всего биологических и литогенных объектов обнаружено в пробе «Фирн 30–60 см», возраст которой ориентировочно соответствует интервалу 1982–1944 гг. (таблица). В целом, этот временной интервал по метеоданным внутриконтинентальной ст. Амундсен-Скотт [4] соответствует периоду похолодания в Антарктиде (рис. 2б).

Период похолодания характеризуется минимальным выветриванием материала из горных пород оазиса Ширмахера и низким развитием биологических объектов, что и отражается в исследуемой пробе «Фирн 30–60 см». Период потепления характеризуется активным развитием биологических объектов и выветриванием из горных пород минеральных зерен, которые сохраняются в поверхностном слое Антарктического ледяного щита. Анализируя инструментальные данные среднегодовой температуры воздуха в Центральной Антарктиде за более чем столетний период (рис. 2), можно утверждать, что последние 30 лет были самыми теплыми (рис. 2в). Этому периоду соответствует проба «Фирн 0–30 см», для которой характерно максимальное количество как биогенных, так и литогенных микрочастиц, с наибольшим биологическим разнообразием (таблица), что типично для теплой климатической стадии.

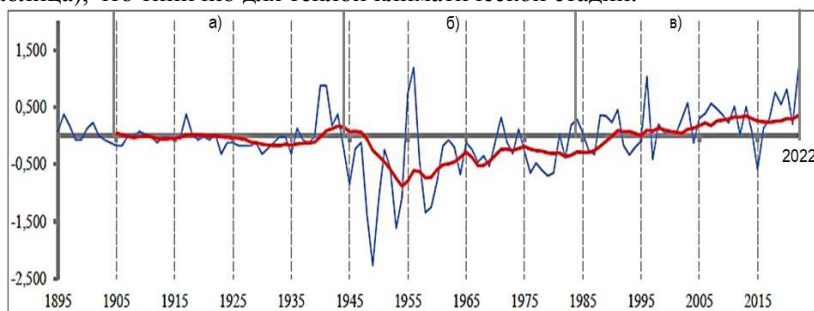


Рис. 2. Линейный график среднегодовых отклонений температуры (°C) от медиан на Антарктической станции Амундсен-Скотт с 1895 по 2022 гг.: синий цвет – среднегодовые отклонения от медианы, красный цвет – линия тренда [4].

Заключение. На всем протяжении ледяного керна преобладали минеральные зерна (60–75%) габбро-диоритового состава кристаллических пород докембрийского возраста оазиса Ширмахера. Биологические объекты представлены в основном растительными остатками, спорами мхов, лишайников и водорослей, так же встречаются споры и колонии бактерий и грибов. В целом из-за сурового термического режима, отсутствия жидких осадков, низкой влажности воздуха, частых и сильных ветров создаются

условия крайне неблагоприятные для развития биологического разнообразия. По вертикали ледяного керна поверхности Антарктического ледяного щита биологические и минеральные объекты локализуются неравномерно, что связано с периодами потепления и похолодания в Антарктиде за последние 100 лет. Период потепления характеризуется активным развитием биологических объектов и выветриванием минеральных зерен горных пород оазиса Ширмахера, которые сохраняются в поверхностном слое Антарктического ледяного щита – проба «Фирн 0–30 см». Период похолодания характеризуется минимальным выветриванием горных пород и слабым развитием биологических объектов, что отражается в исследуемой пробе «Фирн 30–60 см».

Авторы благодарят отряд «Антарктическая наука» «Московской Молодежной Антарктической Экспедиции – 2024» и Матвея Дмитриевича Шпаро, директора ГБУ г. Москвы «Центр дополнительного образования «Лаборатория путешествий» за помощь в сборе материала.

Экспедиционные исследования выполнены при поддержке ГБУ г. Москвы «Центр дополнительного образования «Лаборатория путешествий» в рамках проекта Департамента образования и науки города Москвы «Московская Молодежная Антарктическая Экспедиция – 2024». Результаты исследований, представленные в разделе «Результаты и их обсуждение», получены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абызов С.С., Мицкевич И.Н., Иванов М.В. Микроорганизмы в антарктическом леднике // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2010. №. 1 (1). С. 9–16.
2. Котляков В.М., Глазовский А.Ф., Москалевский М.Ю. Динамика массы льда в Антарктиде в эпоху потепления // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 2. С. 149–169.
3. Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Клювиткин А.А. Рассеянное осадочное вещество в морской криосистеме: снег–дрейфующий лед–подледная вода Арктики и Антарктики // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 740–746.
4. Жукова Ж.С. Динамика изменения среднегодовых температур в Антарктиде // Современные наука и образование: достижения и перспективы развития. III Национальной научно-практической конференции. Керчь. 2023. С. 161–165.

The results of a 2024 study of cryosols (insoluble particles) from an ice core (0–90 cm) from the surface of the Antarctic Ice Sheet at Schirmacher Oasis are presented. Biological and mineral features are distributed unevenly along the ice core's vertical axis, reflecting warming and cooling periods in Antarctica over the past 100 years.

*Научное издание
Сборник*

ISBN 978-5-6051054-8-0

DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-8-0>

**Геология морей и океанов
Материалы XXVI Международной научной конференции
(Школы) по морской геологии.**

Том II.

**Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
2025. – 279 с.**

ISBN 978-5-6051054-8-0



ISBN 978-5-6051054-7-3