

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Шиндина Н.Е., Казак Е.С. Комплексный подход к типизации состава поровых вод донных осадков северо-западной части арктического шельфа Баренцева и Карского морей // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.73532 EDN: UEHLVJ URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73532

Комплексный подход к типизации состава поровых вод донных осадков северо-западной части арктического шельфа Баренцева и Карского морей

Шиндина Наталья Евгеньевна

аспирант; Геологический факультет; Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ shindina-98@mail.ru



Казак Екатерина Сергеевна

кандидат геолого-минералогических наук

в. н. с.; Геологический факультет; Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ kanigu@mail.ru



[Статья из рубрики "Подземные и поверхностные воды холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.3.73532

EDN:

UEHLVJ

Дата направления статьи в редакцию:

01-03-2025

Аннотация: Данная статья посвящена исследованию поровых вод донных отложений слабоизученных районов северо-западной части шельфа российской Арктики. Исследования проводились на образцах поровых вод современных донных отложений (мощностью до 3 м), отобранных в ходе полевых морских экспедиций в северной части Баренцево-Карскоморского шельфа. Рассмотрены процессы формирования химического состава поровых вод, их происхождения и эволюции, взаимодействия со вмещающим осадком, с газами и органическим веществом. Выделены характерные особенности этих

процессов в условиях низких температур и с учётом специфики четвертичной истории развития региона. Получение новых сведений о системе «поровые воды-донные осадки» крайне актуально как для общего понимания процессов арктического седиментогенеза шельфовых морей, так и для поиска месторождений углеводородов на шельфах российской Арктики. Типизация компонентного состава поровых вод донных отложений проводилась путем комбинирования статистического и геохимического подходов. В результате удалось выделить четыре различных типа поровых вод (седиментационные, диагенетические, опресненные и переходного типа). Установлено, что химический состав большинства исследованных образцов поровых вод относится к седиментационному типу. Этот тип вод не претерпел значительных изменений в процессе раннего диагенеза и соответствует составу морской воды. В части образцов поровых вод был установлен диагенетический тип поровых вод, сформированный за счет проявления процессов сульфатредукции и свидетельствующий о начале дигенетических преобразований в направлении прямой метафоризации состава. Станции с более слабым проявлением диагенетических процессов были отнесены к переходному типу. К опресненному типу были отнесены станции, в плотных маловлажных образцах которых было выявлено снижение минерализации поровых вод за счет почти пропорционального уменьшения концентраций основных макрокомпонентов. Используемый в статье подход кластеризации химических анализов поровых вод может быть использован для других арктических районов.

Ключевые слова:

поровые воды, донные отложения, Баренцево море, Карское море, компоненты химического состава, кластерный анализ, прямая метаморфизация, арктический седиментогенез, сульфатредукция, опреснение с глубиной

Введение

Изучение гидрохимических характеристик поровых вод в Баренцевом и Карском морях были начаты во второй половине XX века [\[1\]](#). Однако, исследований в северо-восточной части шельфа практически не проводилось, поскольку высокоширотные области по ледовым и погодным условиям являются труднодоступными. Получение новых сведений о системе «поровые воды - донные осадки» является большим шагом для общего понимания процессов арктического седиментогенеза шельфовых морей, а также поиска залежей углеводородов в российской Арктике.

Химический состав седиментогенных поровых вод тесно связан как с составом захоранивающейся морской воды, так и с процессами взаимодействия между поровой водой и вмещающим осадком: отложенным минеральным и органическим веществом, а также газовой и биогенной составляющими [\[2\]](#). Кроме того, в процессе осадконакопления происходит изменение влажности осадка за счет его уплотнения и отжима части свободной воды. В начальный период формирования донных отложений их относительная влажность составляет 80-120%, а затем снижается в 2-3 раза в верхних 10-15 м разреза [\[3\]](#).

Протекающие в системе физико-химические (концентрирование, растворение, осаждение и другие) и биохимические (преимущественно восстановление сульфатов) реакции ведут к направленному труднообратимому или необратимому изменению – метаморфизации

химического состава вод [\[4, 5\]](#).

Современное состояние поровых вод отражает протекание процессов метаморфизации в большей или меньшей степени, в результате чего формируются различные генетические типы воды. Ю.Н. Гурский [\[6\]](#) на основании детального изучения химического состава поровых вод донных осадков океанов и морей выделил 3 класса поровых вод в соответствии со стадиями их генетической эволюции:

I тип – седиментационные воды – поровые воды сохранившие основной состав захороненной морской воды.

II тип – диагенетические воды – поровые воды, химический состав которых отражает результаты диагенетических процессов (процессы сульфатредукции, анаэробного окисления/восстановления, сорбции, растворения, аутигенного минералообразования и пр.).

III тип – эпигенетические воды – поровые воды, химический состав которых отражается вторичные изменения, связанные с миграцией и перераспределением вещества, вызванные притоком вод иного состава (вследствие субмаринной разгрузки, антропогенного загрязнения, грязевого вулканизма и пр.).

Однако полученные нами закономерности изменения химического состава поровых вод донных осадков северной части шельфа Баренцева и Карского морей требуют дополнения существующей классификации вследствие особенностей развития седиментогенеза в арктических условиях (низкие температуры, низкое содержание органического вещества) и с учётом специфики четвертичной истории развития региона.

Данная работа посвящена изучению и типизации химического облика поровых вод донных отложений слабоизученных северных районов Баренцево-Карского шельфа, а также установлению закономерностей формирования их химического состава в зависимости от стадии генетической эволюции системы «поровые воды – осадки – газы – органическое вещество».

Материалы и методы

Образцы для исследования химического состава поровых вод донных отложений были отобраны в северо-восточной части шельфа Баренцева моря, а также в северной части шельфа Карского моря в ходе экспедиций TTR-19, TTR-20, TTR-21 и TTR-23 по программе "Обучение-через-исследование" (Training-through-Research), организованных геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рис. 1). Отбор кернового материала осуществлялся с помощью ударной трубки на структурах дна, предварительно изученных в ходе экспедиции геофизическими методами. Всего в работе анализируются данные по 190 образцам поровых вод, отобраным на 56 станциях пробоотбора. Из керна одной станции отбиралось несколько образцов (от 2 до 4) с разных интервалов вскрытого разреза донных отложений. Также изучено 4 образца поверхностных морских вод, отобранных в разных частях исследуемого региона (рис. 1).

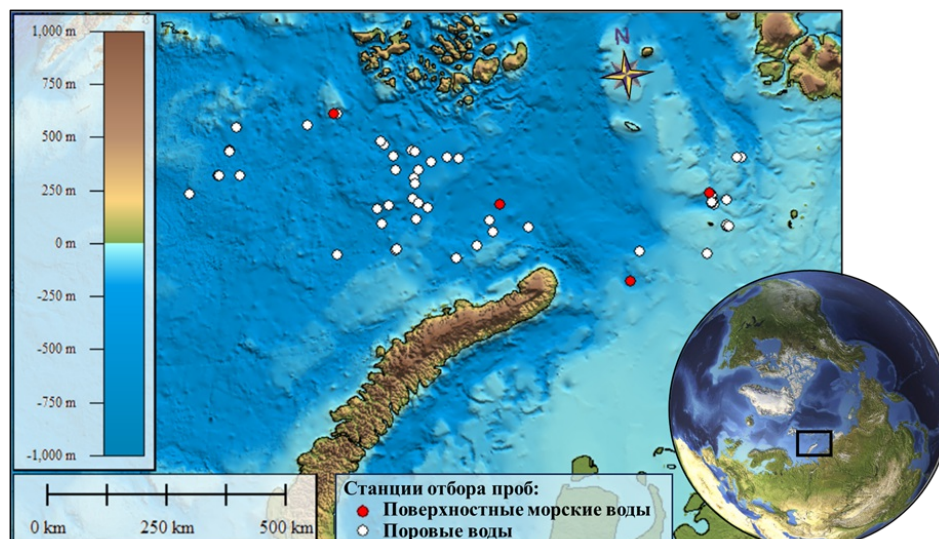


Рис. 1. Положение станций пробоотбора поровых и поверхностных морских вод в пределах северной части Баренцево-Карского шельфа

Исследование керна после вскрытия колонки включали в себя измерения величин pH (± 0.02 ед.) и Eh (± 12 мВ) в интервалах отбора образцов (но не в самих образцах во избежание загрязнения проб) с помощью прибора Эксперт-001 с тремя стеклянными электродами. Также для образцов проводились определения влажности по разности массы естественного и высушенного при $105^\circ C$ осадка по методу, изложенному в работе [7].

Выделение поровой воды осуществлялось методом центрифугирования. Однако для некоторых образцов был сделан дублирующий отбор пробы воды подтягиванием при помощи пробоотборников Rhizon [8] для верификации данных и установления надежности метода извлечения поровых вод из арктических донных отложений.

Извлечение вод методом центрифугирования проводилось на приборе ОПН-16 в течении 15 минут на скорости 3000 - 4000 оборотов/мин. Для этого пробы донных отложений (приблизительно по 50 г) отбирались в пластиковые пробирки и взвешивались на аналитических весах «ANDGR-300» с точностью до 10^{-4} г. После чего, четное число пробирок (2 или 4) помещалось в гнезда ротора центрифуги. По окончании работы центрифуги пробирки извлекались, а выделенная поровая вода фильтровалась с помощью специального шприца с мембранным фильтром (0,45 мкм).

Пробоотборники Rhizon устанавливались непосредственно в ненарушенную колонку керна на 25 минут, при этом мембранные фильтры пробоотборников предварительно замачивались в дистиллированной воде на 2 часа и первая порция отобранной пробы поровых вод (600 мкл) сливалась из пробоотборника для исключения возможности разбавления проб.

Во всех образцах выделенных поровых водах методом объемного титрования было определено содержание HCO_3^- (± 8 отн. %); методами жидкостной хроматографии и капиллярного электрофореза – содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} (± 10 отн. %). Содержание микроэлементов (B, Br, Sr, Mn, Si, Fe) определялось методом ИСП-МС (± 3 отн. %).

Для типизации поровых вод по химическому составу с учетом стадий их генетической

эволюции использовалась диаграмма М. Г. Валяшко [9], отражающая процессы метаморфизации природных вод. Так на диаграмме были нанесены точки, характеризующие поверхностную морскую воду (для более корректной характеристики протяженного региона исследований рассматривались 4 точки морской воды, отобранной из различных частей), от которых далее отталкивались при анализе направлений изменения состава.

Положение точек на диаграмме М. Г. Валяшко в нашем случае определялись параметрами «е» и «d», рассчитываемыми по данным макрокомпонентного состава поровых вод [9,10]:

$$d = \frac{Alk + SO_4 - Ca}{(SO_4 + Cl + Alk) - Ca} * 100\%, \quad e = \frac{Mg}{(SO_4 + Cl + Alk) - Ca} * 100\%, \quad (1)$$

Для типизации поровых вод по химическому составу было проведено разбиение данных химического состава поровых вод исследуемых донных осадков методом кластерного анализа К-средних в программе Statistica [11]. Принадлежность вод к одному или разным типам на диаграмме определялась расстоянием между точками в двумерном Евклидовом пространстве [12], образованном в данном случае координатными осями «е» и «d»:

$$E(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{n=1}^p (X_{ni} - X_{nj})^2}, \quad (2)$$

где E – Евклидово расстояние; X_i – набор характеристик «е» и «d» для i -ой точки; X_j – набор характеристик «е» и «d» для точки j -ой точки; p – общее количество точек поровых вод в выборке; n – номер индекса в матрице значений.

Для каждой точки было получено Евклидово расстояние и использован метод центроидной кластеризации, где для кластеров рассчитываются средние значения переменных, относящихся к ним наблюдений. Таким образом, кластерный анализ данных позволил нам получить картину близких распределений компонентов химического состава образцов поровых вод.

Для каждого кластера было проанализировано поведение химического макрокомпонентного состава поровых вод, а также параметров минерализации, pH, влажности, содержание микрокомпонентов (B, Br, Sr, Mn, Si, Fe).

Результаты исследования

Несмотря на различие в принципах работы методов извлечения поровых вод [8] был сделан вывод получения кондиционных проб воды для анализа как методом центрифугирования, так и подтягиванием пробоотборниками Rhizon. Концентрации компонентов химического состава в поровых водах, извлеченных обоими методами, соотносились в пределах ошибки определения методов исследования, а порой существенное содержание глинистых минералов в образцах (в среднем - от 15 до 46 масс.%, иногда - до 95% [13,14]) не оказывало влияния на состав вод при использовании параметров описанной выше методики извлечения.

Все исследованные пробы поровых вод имеют хлоридно-натриевый состав. По классификации В. А. Сулина [15] их характеризует морской генезис (хлоридно-магниевый тип). По классификации М. Г. Валяшко [9], все пробы поровых вод, а также пробы поверхностной морской воды, относятся к сульфатному типу, магниевому подтипу, лежат в центральной области диаграммы Валяшко (рис. 2).

Значения pH исследованных проб поровых вод изменяются от 6,22 — 8,63 (в среднем - 7,71). Вдоль керна одной станции значения кислотно-щелочного показателя pH обычно изменяются крайне незначительно, иногда прослеживается тенденция его небольшого постепенного повышения с глубиной, обусловленного, вероятно, начинающимися процессами сульфат редукции.

В свою очередь, значение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в системе «донные осадки-поровые воды-газы», изменяется от -406 до +243 мВ (в среднем --66 мВ). Динамика изменения окислительно-восстановительного потенциала с глубиной схожа для кернов всех исследованных станций. Верхние 0-15 см осадка обычно представлены окисленным слоем с положительными значениями потенциала. Иногда, на некоторых станциях, отбирался керн, не имеющий зону окисления. В целом, распределение Eh по глубине колонки отложений практически однородно, а отклонения чаще всего тесно связаны с литологическим составом отложений: зернистые прослои (алеврит, песок) имеют более высокие значения окислительно-восстановительного потенциала, а существенно пелитовые слои с гидротроилитом показывают более низкие значения.

Содержание хлор-иона в исследуемых иловых водах изменяется от 16,5 до 20,8 г/л (в среднем 19,6 г/л), содержание Na^{+} - в пределах 11,0 – 13,4 г/л (в среднем 11,0 г/л), содержание Mg^{2+} изменяется от 0,9 до 1,6 г/л (в среднем 1,2 г/л), а K^{+} - от 0,3 до 0,8 г/л (в среднем 0,5 г/л). Содержание SO_4^{2-} изменяется от 0,9 до 3,7 г/л (в среднем 2,6 г/л), а концентрации HCO_3^{-} достигают 0,9 г/л (среднее 0,2 г/л). Минерализация (ΣM) исследованных поровых вод находится в пределах от 31,0 до 37,3 г/л. Причем наиболее пресные образцы (31,0 – 33,5 г/л) встречаются лишь в некоторых плотных маловлажных образцах керна на глубине более 1,5 м ниже уровня дна.

Полученные результаты соотносятся с данными других исследований, проведенных в Баренцевом и Карском морях. Минерализация поровых вод донных осадков по данным Е. С. Казак и др. [\[13\]](#) составляет от 28,95 до 45,4 г/л, по данным Л. Г. Павловой [\[16\]](#) - от 32,1 до 42,1 г/л и по данным Ю. Н. Гурского [\[10\]](#) от 34,08 до 40,97 г/л. Максимальные значения минерализации поровых вод обнаружены другими исследователями в центральной части Баренцева моря, не рассматриваемой в нашем исследовании.

По результатам кластеризации химического состава поровых вод для 190 проб поровых и 4 проб поверхностных морских вод удалось выделить 4 кластера (показаны разными цветами на рис. 2). Значения центров каждого кластера (средние значения «d» и «e») приведены на врезке рис. 2.

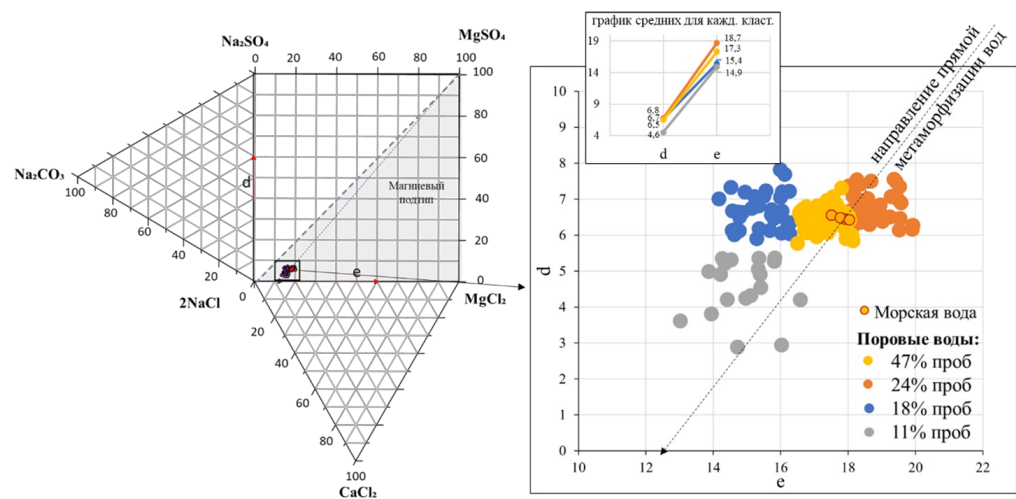


Рис. 2. Диаграмма Валяшко химического состава поровых вод с выделенными кластерами

Как видно из диаграммы (рис. 2) все точки поверхностной морской воды (желтые точки с красным контуром) сосредоточены **в центральном (желтом) кластере**, к которому также принадлежит значительное количество проб поровых вод (47%). В данных пробах состав поровых вод максимально близок к поверхностным (таблица 1), поэтому они были отнесены нами к I типу генетической классификации Ю.Н. Гурского – водам седиментационного морского генезиса.

Таблица 1. Содержание основных компонентов состава поверхностных морских и поровых вод каждого кластера

Компонент*	Морская вода	Поровая вода			
Кластер	Кластер 1 (4 пробы)	Кластер 1 (90 проб)	Кластер 2 (46 проб)	Кластер 3 (34 пробы)	Кластер 4 (20 проб)
СГ, г/л	<u>18,3-21,1</u> 19,8	<u>17,6-20,8</u> 19,7	<u>16,5-19,9</u> 18,8	<u>17,6-20,3</u> 19,4	<u>18,2-20,2</u> 19,4
SO ₄ ²⁻ , г/л	<u>2,5-2,8</u> 2,6	<u>1,6-2,9</u> 2,7	<u>2,3-2,9</u> 2,7	<u>1,5-3,3</u> 2,5	<u>0,9-2,2</u> 1,8
HCO ₃ ⁻ , г/л	<u>0,1-0,2</u> 0,1	<u>0,1-0,4</u> 0,2	<u>0,1-0,3</u> 0,2	<u>0,1-0,9</u> 0,3	<u>0,1-0,9</u> 0,4
Na ⁺ , г/л	<u>10,2-11,3</u> 10,6	<u>10,0-11,5</u> 10,9	<u>9,3-12,5</u> 10,6	<u>9,8-13,3</u> 11,3	<u>10,2-11,5</u> 10,9
Mg ²⁺ , г/л	<u>1,2-1,4</u> 1,3	<u>1,1-1,3</u> 1,2	<u>1,0-1,4</u> 1,3	<u>1,0-1,3</u> 1,1	<u>0,9-1,2</u> 1,0
Ca ²⁺ , г/л	<u>0,3-0,4</u> 0,4	<u>0,2-0,4</u> 0,4	<u>0,3-0,5</u> 0,4	<u>0,2-0,5</u> 0,3	<u>0,2-0,4</u> 0,3
K ⁺ , г/л	<u>0,3-0,4</u> 0,4	<u>0,3-0,6</u> 0,4	<u>0,3-0,5</u> 0,4	<u>0,4-0,8</u> 0,6	<u>0,4-0,6</u> 0,5

ΣМ, г/л	<u>34,2-38,8</u>	<u>33,5-37,3</u>	<u>31,0-35,8</u>	<u>34,1-37,0</u>	<u>32,8-35,5</u>
	36,4	35,6	34,2	35,1	34,4
рН, ед.	<u>7,9-8,4</u>	<u>6,5-8,6</u>	<u>6,2-8,5</u>	<u>6,7-8,5</u>	<u>7,0-8,2</u>
	8,0	7,7	7,7	7,7	7,6
Влажность, %	–	<u>51-92</u>	<u>25-91</u>	<u>46-79</u>	<u>56-79</u>
		67	48	62	64

мин. знач. – макс. знач.

среднее знач.

* - концентрации компонентов в таблице приведены в формате

Оранжевый кластер объединяет облако точек, слегка смещенных вправо от точки морской воды и от угла диаграммы с параметром 2NaCl (рис. 2). Крайние правые точки этого облака характеризуют поровые воды, выделенные из плотных маловлажных образцов нижних частей колонок донных осадков с наименьшими обнаруженными значениями минерализации (минимальные значения в таблице 1). При этом к данному кластеру относятся также и вышележащие практически непреобразованные относительно морской воды образцы, отобранные из этих же станций. Таким образом, считаем, что опреснение вод происходит не точечно на определенной на глубине, а свидетельствует о единстве протекающего процесса преобразования по всей глубине станции опробования.

При этом, если рассмотреть образцы по глубине одной станции, то наблюдаемое уменьшение минерализации по глубине в кернах таких станций происходит за счет равномерного снижения содержания основных компонентов состава (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-}) и в относительном процентном соотношении эквивалентные концентрации каждого компонента в нижнем исследуемом образце идентичны верхним образцам (рис. 3) и практически идентичны водам центрального кластера.

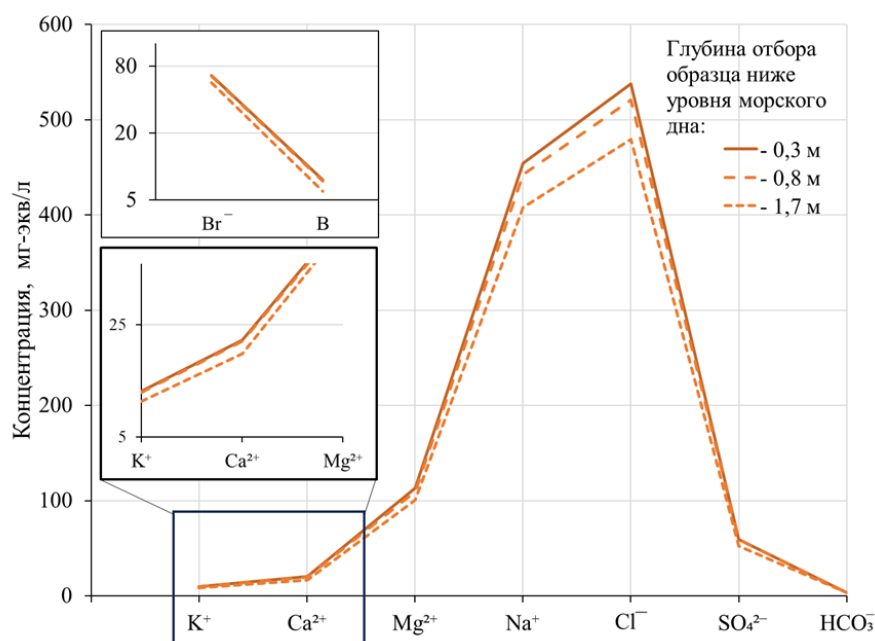


Рис. 3. Диаграмма Шеллера-Беркалоффа химического состава поровых вод донных осадков по глубине одной типовой станции опресненного типа (Ia)

Вероятно, что прослеживающееся опреснение поровых вод донных осадков с глубиной в

некоторых станциях является отголоском последнего позднеплейстоцен-голоценового оледенения (18-14,5 тыс. лет назад [17]), поскольку при распаде ледников происходило активное накопление пресных вод ледникового генезиса [18]. Последующее морское осадконакопление после отступления ледника запустило процесс осолонения бассейна, однако окончательное выравнивание концентраций на данный момент не завершилось.

Таким образом, точки оранжевого кластера предлагается отнести к новому подтипу – Ia – опреснённых вод.

В ходе нашего исследования также было установлено, что значения минерализации в колонках донных осадков данного кластера напрямую коррелируют со значениями влажности в них – чем ниже влажность, тем меньше минерализация поровых вод (рис. 4). По результатам измерений влажность донных отложений колеблется в широких пределах — от 26 до 92% и в среднем составляет 62%, при этом ее значение снижается с глубиной. Отметим, что в колонках, где влажность осадка изменяется по глубине незначительно (желтый, синий и серый кластеры), снижение минерализации и концентраций компонентов химического состава практически не наблюдается.

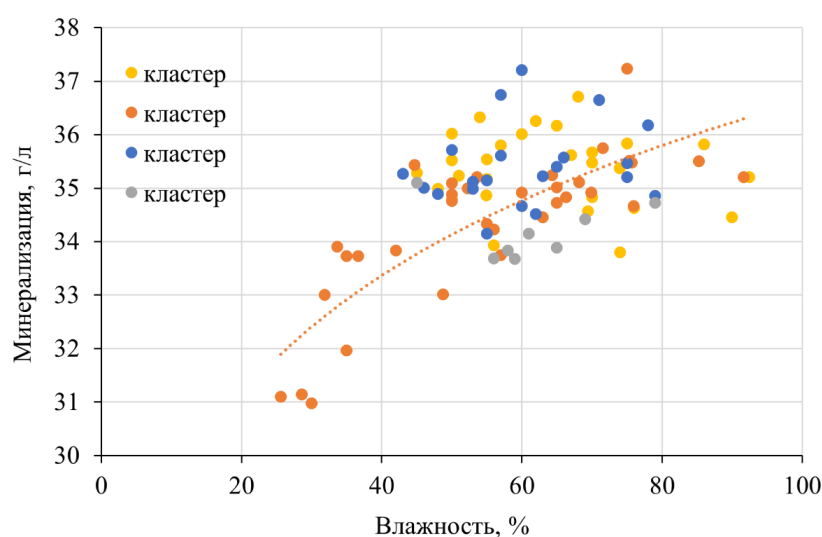


Рис. 4. Зависимость минерализации поровых вод от влажности донных отложений

В **серый кластер** были объединены те пробы поровых вод, которые вытягиваются вдоль линии прямой метаморфизации (рис. 2), проходящей на диаграмме из правого верхнего угла вниз через точку морской воды. Все точки, смещенные на диаграмме вдоль этой линии (влево-вниз), характеризуются наличием начальных диагенетических преобразований, вызванных протеканием процесса редукции сульфатов, что подтверждается результатами анализа их химического состава (таблица 1). В таких станциях наблюдается явное уменьшение содержания сульфат-ионов и возрастание концентрации гидрокарбонат-ионов по глубине, а также незначительное снижение магния и кальция. Согласно полученным результатам, пробы поровых вод серого кластера могут быть отнесены ко II типу вод генетической классификации Ю. Н. Гурского – диагенетическому.

Облако точек **синего кластера** (рис. 2) слегка смещено влево от точки морской воды. Согласно результатам анализа химического состава значения минерализации и pH вод данного кластера практически не отличаются от морских вод, однако наблюдается незначительное снижение содержания сульфат иона и рост содержания гидрокарбонат-иона (таблица 1), что может быть признаком начинающегося процесса сульфатредукции.

Для водданного кластера параметр «d» практически не отличается от вод седиментационного типа, однако параметр «е» уже соответствует водам характерным для диагенетического типа. Учитывая, что пробы поровых вод синего кластера в полной степени не подходят не под один из типов генетической классификации Ю.Н. Гурского [6] и показывают переходные признаки изменения химического состава между I и II типами вод, то они были отнесены нами к новому типу, названному, переходным (тип I-II).

Отметим, что протекание диагенетических процессов в некоторых пробоотборных станциях прослеживались по всей глубине колонки (все пробы поровых вод станции, отобранные с разной глубины, попадали в серый кластер), для других прослеживалось лишь в части образцов поровых вод, на глубинах более 0,5-0,7 м. В таких станциях было зафиксировано изменение типа вод с глубиной по следующим схемам: седиментационные (желтый кластер) – переходного типа (синий кластер) – диагенетические (серый кластер) или седиментационные (желтый кластер) – диагенетические (серый кластер) (рис. 5).

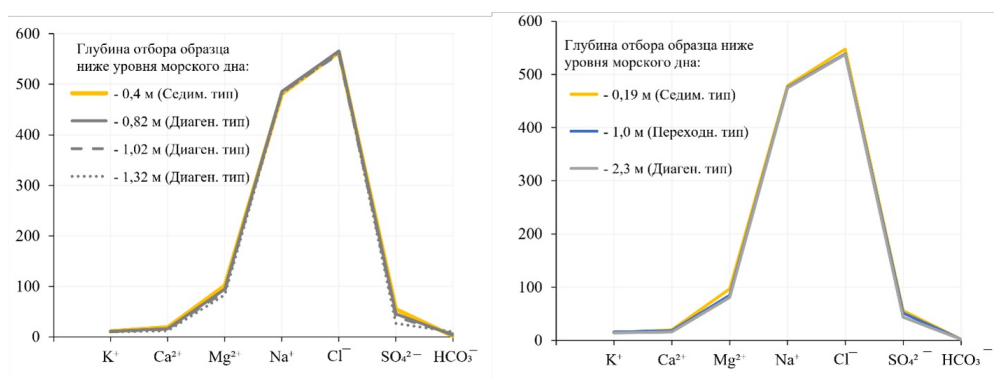


Рис. 5. Диаграмма Шеллера-Беркалоффа химического состава поровых вод донных осадков двух типовых станций с изменением типа вод по глубине

Также для каждого кластера было проанализировано содержание микрокомпонентов в поровых водах (рис. 6,7) и изменение хлор-бромного (Cl/Br) коэффициента (рис. 6). Так средние содержания Br^- (показаны сплошной линией на гистограмме рис. 6) практически одинаковы для всех типов вод: седиментационного, опресненного, диагенетического и переходного, а разброс максимальных и минимальных значений (прерывистые линии на гистограмме) для проб седиментационного и опресненного типа чуть больше, чем для проб диагенетического и переходного генезиса, что вероятнее всего объясняется значительно меньшей выборкой данных, попавших в эти кластеры, нежели их особенностью. При этом величина Cl/Br коэффициента для кластера 2 (эпигенетических вод) заметно ниже, чем у остальных кластеров и составляет в среднем 293 (минимальные значения 263), что отражает снижение концентрации хлоридов в таких станциях.

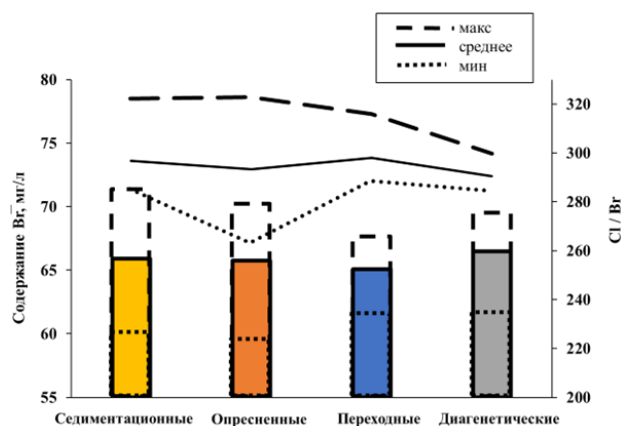


Рис. 6. Комбинированная диаграмма содержания брома (гистограмма) и значений Cl/Br коэффициента (графики) в рассматриваемых пробах поровых вод донных осадков северной части Баренцево-Карского арктического шельфа с разбивкой по типам.

Содержание таких компонентов как бор, марганец, кремний в поровых водах образцов эпигенетического, диагенетического и переходного типа в целом выше, чем в станциях седиментационного типа (рис. 7). Вероятно, это связано с более активными процессами концентрирования вещества в кернах таких станциях. Причем содержание кремния во всех трех типах в среднем практически одинаковое, содержание бора преобладает в опресненных станциях, а содержание марганца, как и содержание общего железа, отличается значимыми концентрациями только в кластере переходного типа. Возможно, в данных станциях также происходит концентрирование этих компонентов при диагенетическом осаждении минералов железа и марганца. Интересным является распределение стронция (Sr^{2+}) по кластерам. В водах седиментационного и диагенетического типов содержания этого компонента примерно одинаковое, тогда как в водах эпигенетического и переходного типа эти концентрации понижены.

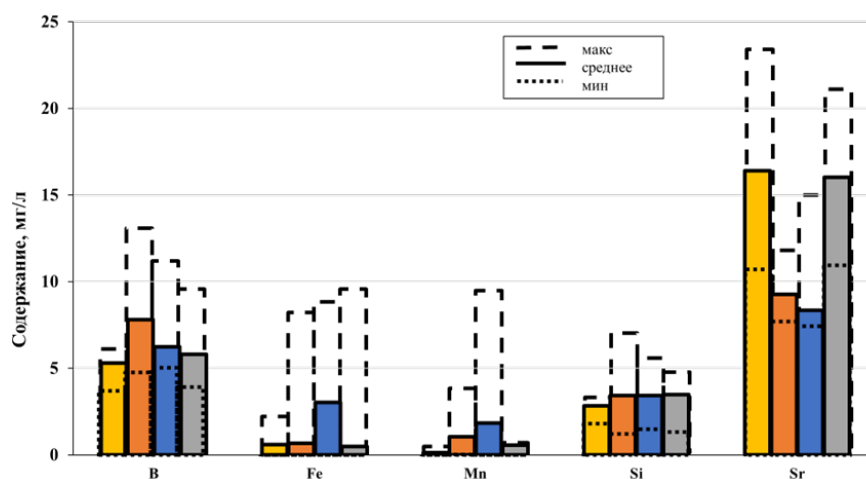


Рис. 7. Содержание некоторых микрокомпонентов в исследуемых пробах поровых водах донных морских осадков северной части Баренцево-Карского арктического шельфа с разбивкой по типам вод

Несмотря на слабые различия в химическом составе поровых вод донных осадков северной части Баренцево-Карского арктического шельфа Баренцева и Карского морей, с помощью использования комплексного подхода анализа данных удалось выделить 4 различных типа вод: седиментационные, эпигенетические, диагенетические (начальная стадия) и воды переходного типа (рис. 8).

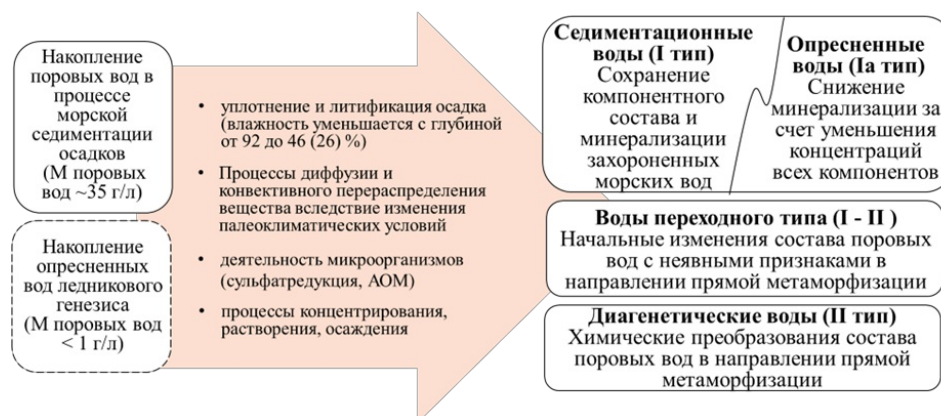


Рис. 8. Обобщенная концептуальная модель формирования химического облика поровых вод донных осадков Баренцево-Карского шельфа

Выделенные типы вод вместе характеризуют динамическое состояние системы «поровые воды – донные осадки» исследуемого арктического региона с учетом условий формирования, стадий процессов эволюции состава и интенсивности их протекания. В северной части Баренцево-Карского шельфа, относительно удаленной от влияния речного и подземного стока, процессы метаморфизации характеризуются особенностями, отражающими различия в обстановках осадконакопления в разные эпохи четвертичного периода – голоценовая морская седиментация в соленоводных условиях или позднеледниковое осадконакопление в бассейне, опресненном за счет интенсивной дегляциации Баренцевоморского палео-ледника [17,18]. Кроме того, метаморфизация отражает интенсивность протекания биохимических процессов преобразования сингенетического или эпигенетического органического вещества донных отложений [19]. Стоит отметить, что поровые воды в большинстве случаев сохраняют свой первичный химический тип, а процессы метаморфизации выражены лишь на локальных участках.

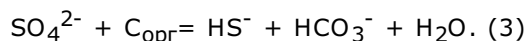
Кроме того, установлено, что в пробах одной и той же станции, отобранных с разных глубин, степень диагенетических преобразований может отличаться и определяется содержанием органического вещества и физико-химическими параметрами системы. Таким образом для арктических регионов, характеризующихся низким содержанием органического вещества [19-23] в донных осадках, следует использовать для исследований геохимии поровых вод станции не короче 0,5 - 0,7 м по глубине.

Обсуждение результатов

В силу климатических и геологических условий протекающие процессы преобразования химического состава поровых вод (опреснение, сульфатредукция и др.) в исследуемом арктическом регионе приводят к слабому изменению компонентов состава вод, которое сложно идентифицировать используя только гидрогеохимический подход. В данной работе для анализа и типизации поровых вод успешно применен комплексный подход, сочетающий в себе химико-аналитические и математические методы интерпретации химических анализов (систематизации данных, построение графиков, диаграмм Валяшко и Шеллера-Беркалоффа, статистическая обработка методом кластерного анализа). Такой подход позволил нам более детально классифицировать процессы метаморфизации исследуемых поровых вод.

Наличие непретворенных вод (седиментационного типа) и вод, отражающих протекание диагенетических процессов, является характерным для большинства шельфовых морей [5]. В исследуемых нами станциях был зафиксирован лишь начальный

этап диагенетического преобразования химического состава поровых вод. При активном протекании процесса прямой метаморфизации точки, относящиеся к пробам диагенетического типа, должны были бы быть расположены в нижней треугольной области диаграммы Валяшко (рис. 2), вытягиваясь вдоль линии прямой метаморфизации до самого её основания CaCl_2 , что для рассматриваемых станций не наблюдается. Слабая интенсивность протекания процессов прямой метаморфизации вероятнее всего обусловлена низкими температурами и довольно низким содержанием органического вещества ($\text{C}_{\text{орг}}$), поскольку для его окисления используется кислород сульфатов, что ведет к биохимическому восстановлению сульфатов до сероводорода, при этом, щелочность поровых вод увеличивается согласно реакции:



Так, содержание общего органического углерода в донных осадках Баренцева моря по данным Л. Ю. Сигачевой и соавторов для рассматриваемых в работе станций (рис. 1) составляет от 0,34 до 3,19 масс.% [20,21]. По литературным данным также фиксируются невысокие значения: Т. И. Горшкова [19] отмечает содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ от 0,15 до 3,12 масс.% (в среднем 1,23 масс.%), Ю. Н. Гурский [10] оценивает содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в поровых водах в диапазоне 0,34-2,67 масс.%, а Л. Г. Павлова [16] упоминает среднее значение $\text{C}_{\text{орг}}$ равное 0,81 масс.%. В свою очередь, содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в донных осадках Карского моря по данным Штейна Р. и Фаль К. (Stein R.&Fahl K.) [22] составляет от 0,35 до 3,18 масс.%, содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ по данным А. Г. Розанова [23] составляет 0,39-1,18 масс.%, а по данным А. Ю. Леина и соавторов [24] содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ составляет в поровой воде 0,4-2,8 масс.%.

Кроме того, уменьшение содержание сульфатов в воде может быть связано с процессом анаэробного окисления метана, протекающего в местах разгрузки термогенных флюидов [25]. Таким образом, выявление диагенетического типа вод в данном регионе может быть также косвенным признаком флюидоразгрузки. Исследуемые станции в Баренцевом море характеризуется низкими содержаниями углеводородных газов (до 5 ppm, редко до 60-63,8 ppm) [26,27], однако исследуемые станции в Карском море (рис. 1) местами характеризуются более высокими концентрациями – до 760 ppm [28].

Выделение вод опресненного типа обусловлено историей развития арктического региона и не является классическим для большинства донных осадков морей и океанов [5]. Тем не менее, в ряде работ [10,16,18,29] упоминаются схожие тенденции снижения минерализации с глубиной колонки донных осадков, что дает основание для необходимости выделения этого типа вод. Так, Ю. Н. Гурский в своей работе [10] приводит подобное распределение компонентов химического состава иловых вод Баренцева и Белого морей и считает его следствием постепенного осолонения бассейна за счет проникновения вод океана, принимая во внимание «выравнивающую роль диффузионного процесса». Л. Г. Павлова [16] также предполагает влияние талых вод ледников в эпохи потепления на современное состояние поровых вод Баренцева моря. Ю. А. Павлидис [18] упоминает, что уменьшение концентрации хлоридов по глубине является хорошим маркером для установления палеогеографической обстановки в Баренцевом море эпохи максимума последнего оледенения. Кроме того, Ю. А. Павлидис отмечает, что верхняя часть разреза, сложенная оливково-серыми пелитовыми илами с

высокой влажностью, характеризуется минерализацией близкой к поверхностным морским водам, в ниже залегающих пелитовых илах хлорид иона снижается до 16-18 г/л (влажность осадка 37-50%, плотность – 1,4-2,0 г/см³), а нижняя часть разреза, представленная темно-серыми пелитовыми илами повышенной плотности (1,8-2,2 г/см³), характеризуется пониженными концентрациями иона хлора (15,7-18,3 г/л) при пониженной влажности (14,2-27,1%) осадка. А. Ю. Лейн [\[29\]](#) не приводит данные химического состава вод из образцов отобранных глубже верхних 20-30 см донных отложений, однако акцентирует внимание, что в нижележащих образцах наблюдалось опреснение и как следствие снижение содержания хлор-иона.

Заключение

Проведенный комплексный анализ процессов формирования системы «поровые воды-осадки – газы – органическое вещество» для северной части Баренцево-Карского шельфа позволил выделить следующие типы поровых вод: седиментационные (47% проб), характеризующиеся «консервативным» составом поровых вод, соответствующим составу поверхностной морской воды; эпигенетические (опресненные) (24% проб), диагенетические (11% проб), подвергшиеся в начальной степени процессам прямой метаморфизации, а также воды переходного типа (18% проб) – от седиментационных к диагенетическим.

Анализ состава некоторых микрокомпонентов (бор, бром, марганец, кремний, стронций, железо общее) не показал принципиальных закономерностей в принадлежности к тому или иному кластеру или типу вод. Это указывает на то, что в верхней части донных осадков исследуемого арктического региона содержание микроэлементов слабо реагируют на изменение генетического типа вод, поэтому использование содержания данных компонентов для типизации вод по стадиями их генетической эволюции неинформативно.

Комбинированный статистический и геохимический подход может быть удачно масштабирован на весь Арктический шельф, а также моря и океаны других климатических зон. Однако важно понимать, что от глубины отбора пробы донных осадков определяет возможность достоверной типизации вод при решении определенных задач, поскольку в одной колонке по глубине происходит смена типов вод в зависимости от степени их метаморфизации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансирование экспедиций TTR-19, TTR-20, TTR-21 и TTR-23 по программе «Обучение-через-исследования», а также кафедре геохимии МГУ имени М.В. Ломоносова за проведение химического анализа 30 проб поровых вод методом капиллярного электрофореза с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ (Система капиллярного электрофореза со спектрофотометрическим детектированием, СКЭ «Капель-205»).

Библиография

1. Современные осадки морей и океанов (Труды совещания. 24-27 мая 1960 г.) / [Редколлегия: акад. Н. М. Страхов и др.]. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 646 с.
2. Шиндина Н. Е., Казак Е. С. Исследование донных отложений Арктического шельфа: стратегические задачи, приоритетные цели, методология // Геология, география и глобальная энергия. 2025. № 2(97).

3. Коротков А. И., Павлов А. Н., Юровский Ю. Г. Гидрогеология шельфовых областей. Л.: Недра, 1980. 216 с.
4. Валяшко М. Г., Гурский Ю. Н., Гричук Д. В. О направлении развития химического состава поровых вод в донных отложениях морей и океанов // Литология и полезные ископаемые. 1979. № 4. С. 43-63.
5. Гурский Ю. Н. Иловые воды морей и океанов и процессы формирования их химического состава // Закономерности формирования химического состава природных вод. 1981. С. 32-64.
6. Гурский Ю. Н. Геохимия процессов формирования химического состава поровых (иловых) вод морских отложений и их классификация // Геохимия природных вод. Ленинград: Гидрометиздат, 1985. С. 242-251.
7. Кречетов П. П., Дианова Т. М. Химия почв. Аналитические методы исследования: Учеб. пособие. М.: МГУ, 2009. 248 с.
8. Казак Е. С., Шиндина Н. Е. Лабораторные методы определения состава поровых вод слабопроницаемых отложений // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2025. 64(1). С. 30-40. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-30-40 EDN: OWRCKM.
9. Валяшко М. Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. М.: Изд-во МГУ, 1962.
10. Гурский Ю. Н. Геохимия литогидросферы внутренних морей. Том 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 247-265. EDN: QKFWUB.
11. StatSoft, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 10. 2011. URL: www.statsoft.com.
12. Дюран Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. М.: Статистика, 1977. 128 с.
13. Казак Е. С., Корзун А. В., Ахманов Г. Г., Бакай Е. А. Геохимия поровых вод донных отложений в северо-восточной части шельфа Баренцева моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 5. С. 39-54. EDN: LNMZCN.
14. Ахманов Г. Г., Соломин Г. В., Петрова Е. В. и др. Инженерно-геологические особенности и переуплотнение глинистых неоплейстоценовых отложений северо-восточной части Баренцева моря // Грунтоведение. 2022. № 2. С. 13-26. DOI: 10.53278/2306-9139-2022-2-19-13-26 EDN: TBCZLR.
15. Сулин В. А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод, в частности воды нефтяных месторождений. Ленинград: Изд-во Академии наук СССР, 1948. 107 с.
16. Павлова Л. Г. Геохимия иловых вод в условиях арктического ледово-морского седиментогенеза: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. Мурманск, 2001. 290 с. EDN: VMOKHZ.
17. Demina L. L., Dara O., Alekseeva T., Budko D., Novichkova E., Politova N., Solomatina A., Bulokhov A., Aliev R. Elemental and mineral composition of the Barents Sea recent and late pleistocene–holocene sediments: a correlation with environmental conditions // Minerals. 2020. Vol. 10, № 7. P. 593. DOI: 10.3390/min10070593 EDN: YYELPH.
18. Павлидис Ю. А., Богданов Ю. А., Левченко О. В., Мурдма И. О., Тарасов Г. А. Новые данные о природной обстановке в Баренцевом море в конце валдайского ледниковья // Океанология. 2005. Т. 45, № 1. С. 92-106. EDN: HRVYVT.
19. Горшкова Т. И. Органическое вещество современных шельфовых осадков северных морей СССР // Проблемы геологии шельфа. М.: Наука, 1975. С. 66-72.
20. Сигачева Л. Ю., Видищева О. Н., Ахманов Г. Г. и др. Геохимические характеристики органического вещества донных отложений северной части Баренцева моря как индикатор миграции углеводородов из недр // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 4. С. 42-57. DOI: 10.18599/grs.2023.4.3 EDN: KBNPOK.
21. Сигачева Л. Ю., Валиева Э. И., Видищева О. Н. и др. Органическое вещество донных

- осадков северо-восточной и северной частей Баренцевоморского шельфа (по результатам экспедиций TTR-19 и TTR-20) // Успехи органической геохимии: Материалы 2-й Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых. Новосибирск, 2022. С. 247-250. DOI: 10.25205/978-5-4437-1312-0-247-250 EDN: UWWKCT.
22. Stein R., Fahl K. Total organic carbon in surface sediments // PANGAEA, 2004. URL: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.137002>.
23. Розанов А. Г. Геохимические особенности глубоководных донных отложений Карского моря (Новоземельская впадина, желоб Святой Анны) // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 709-722. DOI: 10.7868/S0030157415030156 EDN: UDEUIJ.
24. Лейн А. Ю., Маккавеев П. Н., Савичев А. С. и др. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 643-679.
25. Meister P., Herda G., Petrishcheva E., Gier S., Dickens G. R., Bauer C., Liu B. Microbial Alkalinity Production and Silicate Alteration in Methane Charged Marine Sediments: Implications for Porewater Chemistry and Diagenetic Carbonate Formation // Front. Earth Sci. 2022. V. 9. P. 1-18.
26. Ахманов Г. Г., Соловьева М. А., Пятилова А. М. и др. Следы "останца" ледникового щита и современная флюидоразгрузка на дне ССВ Баренцева моря: данные геолого-геофизических и геохимических исследований в экспедиции TTR-20 // Морские экспедиционные исследования России в 2022 году: Тезисы докладов конференции "Итоги экспедиционных исследований в 2022 году в Мировом океане, внутренних водах, на архипелаге Шпицберген и полуострове Камчатка". М.: МИРЭА, 2022. С. 62-66.
27. Егошина Е. Д., Видищева О. Н., Полудеткина Е. Н. и др. Состав и происхождение газов из донных отложений СВ Баренцева моря (по результатам экспедиции TTR-19) // Maresedu-2020: Труды IX международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование". Т. 3. 2020. С. 86-89.
28. Киль А. О., Полудеткина Е. Н., Токарев М. Ю. и др. Проявления флюидоразгрузки в верхней части разреза и на морском дне прогиба уединения, Северо-Карский бассейн (по данным экспедиции TTR-21) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 9. 2022. С. 117-122. DOI: 10.24412/2687-1092-2022-9-117-122 EDN: LTLLYF.
29. Леин А. Ю., Кравчишина М. Д., Павлова Г. А. и др. Солевой состав и биогенные элементы в современных иловых водах Баренцева моря (данные 1997–2019 гг.) // Система Баренцева моря (сборник). 2021. С. 370-398. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(28) EDN: CBBNYF.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом изучения в статье является исследование донных отложений Арктического шельфа, постановка стратегических задач, приоритетных целей и методология исследования.

Актуальность исследования очевидна. Автор указывает, что арктическая зона планеты Земля, в силу своей труднодоступности и суровым погодным условиям является малоисследованной. Однако изучение современных донных отложений Арктического шельфа позволяет получить наглядную картину эволюции системы «осадок-вода-газ-органическое вещество-микроорганизмы» в текущем времени, способствуя познанию закономерностей развития осадочных образований в целом. Также донные осадки морей и океанов Арктики представляют интерес для исследователей в связи с наличием

на шельфе запасов полезных ископаемых. По сути арктический регион – одно из немногих мест планеты, где полезные ископаемые практически не затронуты деятельностью человека в связи с суровостью условий работы человека в Арктике. Изучение донных осадков в некоторой степени способствует реконструкции исторической картины хозяйственной деятельности населения материков, а проводимые научные исследования позволяют укреплять геополитические позиции и решать спорные вопросы об установлении границ континентального шельфа. В связи с этим, целью данной статьи является анализ стратегических задач арктических стран (России, Канады, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, Швеции и США) по исследованию донных осадков в рамках этих направлений, а также установление методологического цикла проведения таких исследований.

Методология и новизна исследования автором статьи не представлена. Однако автор отмечает, что необходимо разработать интегрированный подход к изучению донных отложений на основании государственных целей стратегического развития Арктики, который позволит выстроить методологию исследований и создать более целостную картину процессов, происходящих в донных осадках.

Стиль статьи – обзорно-аналитический. Статья не содержит результатов собственных исследований по заявленной теме. Поэтому название статьи не совсем соответствует ее содержанию. Предлагаем из названия исключить фразу «Исследование донных отложений...». Статью можно было назвать: «Стратегические задачи при изучении донных отложений Арктического шельфа». Это название более точно соответствует содержанию статьи, поскольку автор подробно приводит анализ и прогнозирование развития Арктики арктических государств (Норвегии, Дании, Исландии, Канады, Финляндии, Швеции, США и России). А затем кратко уточняет задачи исследования донных осадков в соответствии с национальными целями развития Арктики.

Основным замечанием рецензента является то, что статья не структурирована автором по разделам. Согласно требованиям журнала, структура статьи должна состоять из разделов: введение, результаты и обсуждение, заключение, библиография. Автору необходимо данное пожелание рецензента учесть.

Библиография статьи включает в себя 22 литературных источника, из них 3 - источники иностранных авторов.

Автор приходит к выводу, что изучение донных отложений соответствует стратегическим целям развития Арктики, обеспечивая рациональное использование её природных богатств и устойчивое развитие региона. Комплексная методология исследования донных осадков создает основу для прогнозов наличия на дне океана и в толщах земной коры полезных ископаемых, позволяет ответить на вопросы, связанные с загрязнениями, влиянием изменения климата на планету.

Считаем, что выводы в статье носят очень обобщенный характер и не совсем отражают заявленную тему исследования.

Данная статья может быть рекомендована к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» только после доработки.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, оценка эффективности применения комплексного подхода к типизации состава поровых вод донных осадков северо-западной части арктического шельфа Баренцева и Карского морей, типизации

химического облика поровых вод донных отложений слабоизученных северных районов Баренцево-Карского шельфа, а также установлению закономерностей формирования их химического состава в зависимости от стадии генетической эволюции системы «поровые воды – осадки – газы – органическое вещество»..

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что автором статьи использовался метод Образцы для исследования химического состава поровых вод донных отложений были отобраны в северо-восточной части шельфа Баренцева моря, а также в северной части шельфа Карского моря в ходе экспедиций TTR-19, TTR-20, TTR-21 и TTR-23 по программе "Обучение-через-исследование" (Training-through-Research), организованных геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Выделение поровой воды осуществлялось методом центрифугирования. Для типизации поровых вод по химическому составу с учетом стадий их генетической эволюции использовалась диаграмма М. Г. Валяшко. Для каждой точки было получено Евклидово расстояние и использован метод центроидной кластеризации, где для кластеров рассчитываются средние значения переменных, относящихся к ним наблюдений. Для каждого кластера было проанализировано поведение химического макрокомпонентного состава поровых вод, а также параметров минерализации, pH, влажности, содержание микрокомпонентов (B, Br, Sr, Mn, Si, Fe).

Актуальность затронутой темы безусловна и обусловлена тем, что исследований в северо-восточной части шельфа практически не проводилось, поскольку высокоширотные области по ледовым и погодным условиям являются труднодоступными. Получение новых сведений о системе «поровые воды – донные осадки» является большим шагом для общего понимания процессов арктического седиментогенеза шельфовых морей, а также поиска залежей углеводородов в российской Арктике. В этой связи исследования данного региона является весьма актуальным.

Научная новизна заключается в утверждении о том, что комбинированный статистический и геохимический подход может быть удачно масштабирован на весь Арктический шельф, а также моря и океаны других климатических зон. Однако важно понимать, что от глубины отбора пробы донных осадков определяет возможность достоверной типизации вод при решении определенных задач, поскольку в одной колонке по глубине происходит смена типов вод в зависимости от степени их метаморфизации

Библиография обширна для постановки рассматриваемого вопроса, однако не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся у автора статьи информации, полученной в результате анализа литературных источников и собственных исследований.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.