

На правах рукописи



РУБАН АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ
ОСАДКОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ
(НА ПРИМЕРЕ ГУБЫ БУОР-ХАЯ)**

Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Мазуров Алексей Карпович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор

Научный консультант: **Дударев Олег Викторович**, доктор геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты: **Романкевич Евгений Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (г. Москва), главный научный сотрудник лаборатории химии океана

Бычинский Валерий Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск), старший научный сотрудник лаборатории геохимии окружающей среды и физико-химического моделирования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «19» декабря 2017 года в 16 час 00 мин на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.170.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: Томск, пр. Ленина, 2 (строение 5), 20 корпус ТПУ, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2799/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.-м.н.



Лепокурова Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современный этап изучения и освоения ресурсного потенциала шельфовых морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского диктует необходимость глубокого изучения их природы и на этой основе решения обширного ряда фундаментальных и прикладных проблем. Наряду с огромными углеводородными ресурсами (Геология и полезные ископаемые..., 2002; Павленко, 2013 и др.) восточно-сибирский шельф сосредотачивает в себе значительные ресурсы твердых полезных ископаемых россыпного происхождения, среди которых преобладают золото, платина, олово, редкометалльные и титановые россыпи (Бортников, 2015). К настоящему времени эти россыпи в большинстве случаев оказались погребенными более молодыми прибрежно-морскими отложениями (Павлидис, Никифоров, 2000; Геоэкология, 2001). На этом фоне до сих пор остается слабоизученной минералого-геохимическая специализация верхнего литостратиграфического горизонта, т.е. современных осадков, образовавшихся за последние 2-2.5 тыс. лет субатлантического периода голоцена (Павлидис и др., 1998; Кошелева, Яшин, 1999). С этих позиций наибольший интерес вызывают заливы – приемные бассейны стока крупнейших сибирских рек. Одной из таких структур-ловушек осадочного материала является губа Буор-Хая. Согласно Н.Г. Патык Кара (Патык-Кара, 2002), она характеризуется потенциальными россыпями золота и редких металлов, принимает сток реки Лена и по перечисленным обстоятельствам рассматривается в качестве приоритетного и идеального полигона для исследований. Мотивацией для получения новых знаний, которые бы позволили достоверно и достаточно подробно оценить формирование геохимической специализации современных донных осадков, прежде всего послужила интенсификация геолого-разведочных работ на стратегические сырьевые ресурсы. Другим важным фактором являются современные климатические изменения, негативно влияющие на состояние многолетнемерзлых пород прибрежно-шельфовой криолитозоны. Последствия такого воздействия проявляются в расконсервации и вовлечении в биогеохимический цикл огромного пула древнего органического вещества (Семилетов, 1999; Semiletov et al., 2007; 2011; Shakhova et al., 2017). Роль органического вещества реликтового и речного происхождения крайне высока в областях смешения речных-морских вод, поскольку оно контролирует процессы водной миграции и осаждения многих химических элементов (Биогеохимия океана, 1983; Лисицын, 1994; Гордеев, 2012; Маслов и др., 2014; Демина, 1982). Последний мотивирующий фактор заключается в недостаточном массиве междисциплинарных данных. Имеющаяся для губы

Буор-Хая в открытом доступе ограниченная информация базируется на результатах геологической съемки масштаба 1:200000 только для некоторых участков подводного берегового склона губы. Работы выполнялись «ВНИИМоргео» в 80-90-х годах прошлого столетия с целью прогнозных изысканий на металлоносность (Моря..., 1984; Кошелева, Яшин, 1999; Патык-Кара, 2003). Несколько образцов для геохимических исследований и датировок отобраны в рамках российско-немецкой программы «Система моря Лаптевых» (Holemann et al., 1999). В определенной степени новые данные будут полезными при планировании освоения многообразного ресурсного потенциала восточно-сибирского арктического шельфа. Более того, выявление геохимических особенностей современных осадочных процессов имеет большое значение для реконструкции палеоусловий формирования месторождений полезных ископаемых. Решаемые в работе фундаментальные и практические задачи полностью согласуются с разработанной Правительством РФ концепцией ФЦП «Мировой океан», принятой в июне 2015 г. на период 2016-2031 гг.

Цель работы: выявление литолого-геохимических особенностей современных донных осадков моря Лаптевых.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи:** (1) оценить средние содержания химических элементов в донных осадках; (2) выявить особенности геохимической специализации донных осадков и определить основные факторы, контролирующие пространственное распределение химических элементов, а также способствующие их накоплению; (3) охарактеризовать минералогическую специализацию тяжелой подфракции донных осадков; (4) изучить особенности формирования литологической структуры донных осадков; (5) типизировать обстановки современного осадконакопления по литобиогеохимическим характеристикам.

Фактический материал и методы исследования. Фактическим материалом для написания данной работы послужили пробы взвеси и донных осадков, отобранные в губе Буор-Хая во время научно-исследовательских экспедиций. С целью получения исходного материала осуществлялись:

(1) пробоотбор донных осадков, включая поверхностный слой (дночерпатель Van Veen) и керны (малая гравитационная труба, корер «GEMAX», установка разведочного бурения «УРБ-4Т»;

(2) отбор воды с поверхностного и придонного горизонтов (1.8-5 л батометры системы Niskin), выделение взвешенного материала (фильтровальная система Millipore). Для выявления общего содержания взвеси вода фильтровалась через мембраны с диаметром калиброванных проб 0.45 мкм (Charkin, 2011);

(3) регистрация термохалинной структуры водной толщи обеспечивалась зондами «SBE19 plus» или «SBE19 plus V2» (Semiletov, 2011).

В пробах донных осадков анализировались:

– химический состав. Инструментальным нейтронно-активационного методом INAA определялись концентрации 36 элементов в ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН. Точность анализов макроэлементов $\pm 1\%$, микроэлементов $\pm 10\%$;

– содержание Сорг (пиролизатор «Rock-Eval 6 Turbo», производитель VINCI Technologies). Анализы выполнялись в международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей ТПУ, а также в лабораториях Международного Арктического центра при университете штата Аляска, Фэрбанк;

– изотопный состав органического углерода, $\delta^{13}\text{C}$ (изотопный масс-спектрометр «Delta V advantage» фирмы «Thermo Fisher Scientific»). Исследования проводились в лаборатории геохимии и пластовых нефтей ТомскНИПИнефть;

– гранулометрический состав частиц (лазерный дифракционный микроанализатор «Analysette 22 Fritsch», при необходимости метод совмещался с традиционным классическим водно-механическим анализом (Петелин, 1961). Литологическая типизация осадков и взвеси проводилась на основе трехкомпонентной классификации ТОИ ДВО РАН по соотношению содержания фракций песка Ps (1-0.1 мм), алеврита A (0.1-0,01 мм) и пелита P1 (<0,01 мм) (Лихт и др., 1983). Основные принципы использованной типизации сопоставимы с классификациями ИО АН СССР и ВНИИОкеангеологии (Петелин, 1961; Кошелева, Яшин, 1999);

– состав тяжелой минеральной подфракции крупно-алевритовой фракции (Петелин, 1957);

– содержание общего азота N. Анализ выполнялся на элементном CHNS-анализаторе в центре коллективного пользования ТПУ.

Полученные результаты обрабатывались различными методами статистической обработки.

Основные защищаемые положения.

1. Геохимической специализацией донных осадков губы Буор-Хая являются повышенные содержания Na, K, Ba, Co, Ni, As, Se, Hf, Ta, U, La, Gd, Tb, Dy, Ho и пониженные Ca, Br, Cs по сравнению с их содержаниями в осадочных породах континентальной коры.

2. В пространственном распределении химических элементов в донных осадках губы Буор-Хая проявлена субмеридиональная латеральная зональность, обусловленная разными источниками осадочного материала в

восточной и западной частях губы, а также гидрологическим разделом в осевой части, выполняющим барьерную функцию и ограничивающим перенос и обмен веществом.

3. Среднее содержание органического углерода в терригенных осадках губы Буор-Хая составляет 1,9 %. Максимальные его концентрации приурочены к прибрежной зоне дельты р. Лена. Установлена значимая прямая корреляционная связь органического углерода с Fe, Cr, Co, Ni, Zn, Sc, Br.

Научная новизна. Впервые выявлены геохимические особенности донных осадков одного из наиболее крупных и перспективных на погребенные металлоносные россыпи заливов-ловушек восточно-арктического шельфа – губы Буор-Хая. Для практически всех химических элементов выявлена линейная субмеридиональная структура распределения. Она обусловлена взаимодействием стоковых и шельфовых вод и определяет различный уровень содержания элементов в западной и восточной частях губы. На основании анализа массива междисциплинарных данных выполнено районирование акватории губы по характеру процессов, контролирующей биогеохимический состав донных осадков. Впервые построены карты распределения 37 химических элементов в поверхностном слое донных осадков.

Практическая и теоретическая значимость. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов диссертации для решения прикладных задач, как например планирования освоения ресурсного потенциала района, палеореконструкций условий арктического литогенеза и прогноза его возможных изменений. Изложенные в работе данные расширяют представления о современных осадочных процессах, а также восполняют дефицит информации по геохимическим, минералогическим и литологическим особенностям донных осадков моря Лаптевых.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 в журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты исследований были представлены на российских и международных конференциях и форумах: AGU Fall Meeting (США, г. Сан-Франциско, 2015), XIX, XX, XXI Международных научных симпозиумах студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2015-2017 гг.), X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире (Пермь, 2017), Международном форуме, посвященном изучению биогеохимических последствий деградации вечной мерзлоты в Северном Ледовитом океане (г. Томск, 2016), IX, X Всероссийских научных молодежных конференциях с международным участием с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина «Творчество юных – шаг в успешное будущее» (г. Томск, 2016-

2017). Также результаты исследований докладывались на научных семинарах кафедры геологии и разведки полезных ископаемых НИ ТПУ.

По теме исследований автор принимал участие в выполнении работ по мегагранту Правительства Российской Федерации (грант 14 Z50.31.0012) и гранту Российского научного фонда (грант 15-17-20032).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач, выборе методики исследований. Автор принимал участие в 5 научно-исследовательских экспедициях в период с 2014 по 2016 гг., в ходе которых им была собрана большая часть фактического материала, используемого для написания данной работы. Автор участвовал в отборе донных осадков и взвеси, гидрологических и буровых работах, натурных наблюдениях. При участии автора были получены и обработаны результаты нейтронно-активационного, хромато-масс-спектрометрического, пиролитического, гранулометрического, минералогического анализов донных осадков. Автором лично сформулированы защищаемые положения, проведена статистическая обработка и обобщение полученных результатов, которые изложены в диссертационной работе.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (284 наименования), содержит 59 рисунков и 23 таблицы. Глава 1 посвящена краткому обзору изученности вопроса и методам исследований (стр. 10-17). В главе 2 рассматриваются особенности континентальной области питания и бассейна седиментации (стр. 18-41). Глава 3 содержит анализ экзогенных факторов и процессов, контролирующих поступление, водную миграцию и седиментацию осадочного материала, дает представление о потоках вещества и литологической структуре осадков (стр. 42-79). Ключевая глава 4 раскрывает особенности минералогической и геохимической специализации донных осадков губы (стр. 80-140).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.г.-м.н. профессору Мазурову Алексею Карповичу и научному консультанту д.г.-м.н. Дудареву Олегу Викторовичу за неоценимую помощь и содействие на различных стадиях подготовки данной работы. За ценные советы и консультации автор искренне благодарен д.г.-м.н. Шварцеву С.Л., д.г.-м.н. Рихванову Л.П., д.г.-м.н. Ворошилову В.Г., д.г.н. Савичеву О.Г., д.г.-м.н. Шаховой Н.Е., д.г.н. Григорьеву М.Н., к.г.-м.н. Ананьеву Ю.С., к.г.-м.н. Рудмину М.А.

Выполнению работы способствовало сотрудничество с Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток). Автор признателен Семилетову И.П., Чаркину А.Н. и всем сотрудникам лаборатории арктических исследований.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение

Геохимической специализацией донных осадков губы Буор-Хая являются повышенные содержания Na, K, Ba, Ni, As, Se, Sb, Hf, Ta, U, La, Ce, Eu, Er, Gd, Tb, Dy, Ho и пониженные Ca, Br, Cs по сравнению с их содержаниями в осадочных породах континентальной коры. (Обоснование положения приводится в 4-й главе диссертации)

Губа Буор-Хая расположена в юго-восточной части моря Лаптевых (рисунок 1). По гидролого-морфологическим и палеогеографическим признакам губа представляет собою элементарный седиментационный бассейн с V-образной формой континентального обрамления. По последней причине его акватория относится к полузакрытому типу.

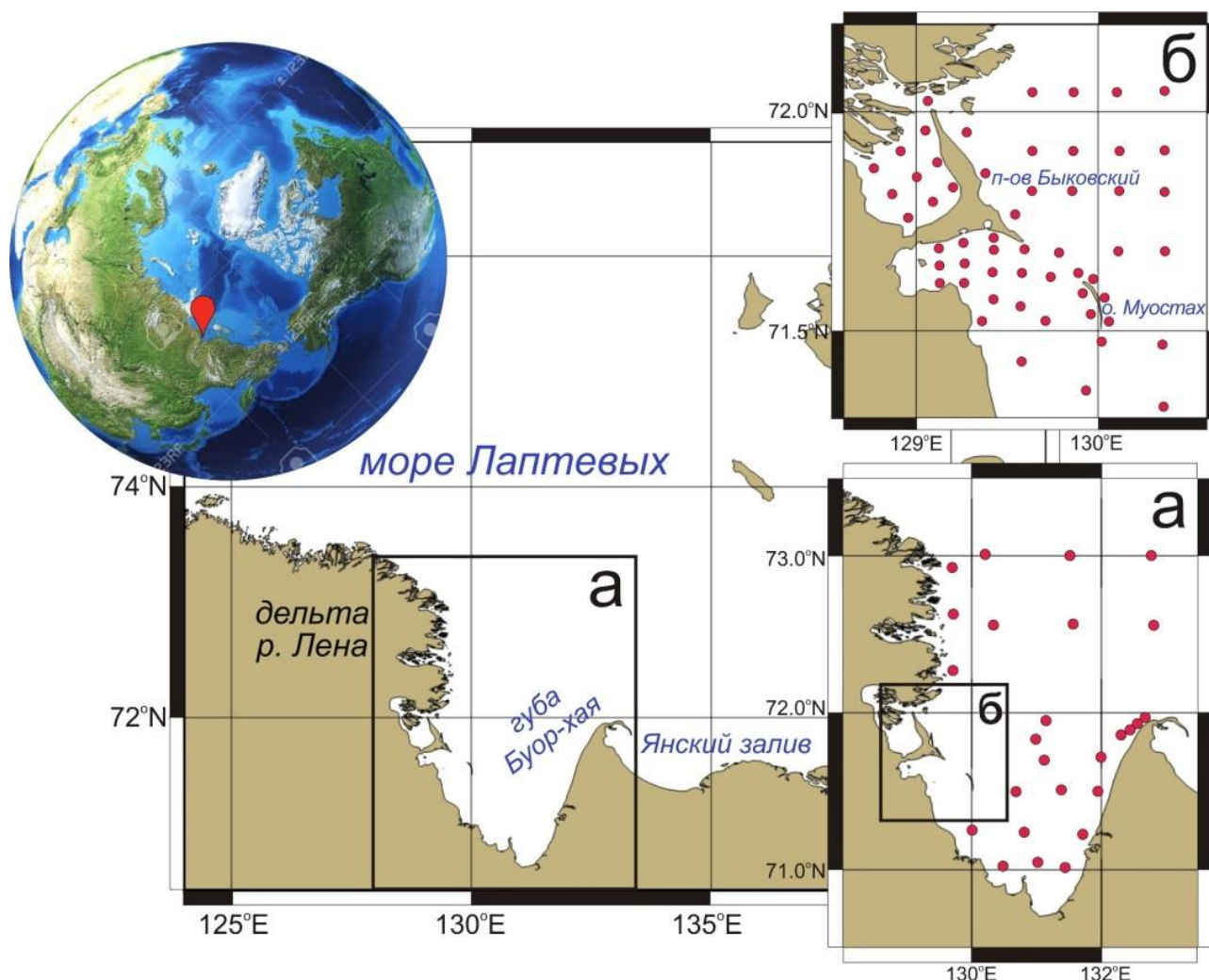


Рисунок - 1. Района исследований и расположение океанографических станций

В Таблице 1 представлены данные о содержании 36 химических элементов в современных донных осадках губы Буор-Хая.

Таблица №1.

Содержание химических элементов в донных осадках губы Буор-Хая

Элемент	Содержание в осадках моря Лаптевых				Коэффициент фракционирования	Среднее содержание для осадочных пород континентов*
	min	max	x	s.d.		
Na	1,0	2,7	1,9	0,3	1,5	1,31
K	0,2	10,0	2,9	3,4	1,3	1,98
Ca	0,2	1,4	0,9	0,3	0,1	7,28
Fe	0,8	5,7	3,5	1,3	0,8	3,54
Rb	10,0	143,6	69,0	34,4	0,8	92,0
Sr	34,0	505,0	189,7	116,4	0,8	270,0
Cs	0,9	8,8	4,7	2,2	0,4	9,5
Ba	275,0	1010,0	536,0	176,9	1,4	410,0
Cr	15,3	103,7	61,6	19,2	0,7	76,6
Co	0,8	20,6	12,8	5,1	0,8	14,0
Ni	10,0	410,0	110,4	107,0	2,8	38,0
Zn	10,0	130,0	73,9	31,4	0,9	69,0
As	0,8	82,4	18,7	17,6	2,0	7,7
Sc	2,7	17,3	11,5	3,9	-	9,7
Se	0,2	8,8	2,2	2,1	3,3	0,6
Br	0,03	13,9	4,6	3,2	0,1	47,0
Zr	18,0	330,0	112,6	77,9	0,8	170,0
Sb	0,3	6,2	1,5	1,4	1,4	0,89
Hf	2,2	16,9	4,8	2,8	1,2	3,9
Ta	0,1	3,4	1,2	0,8	1,2	1,0
Th	3,6	32,7	11,2	5,0	1,0	9,9
U	0,4	12,7	4,7	3,6	1,3	3,2
La	14,4	102,4	42,0	19,0	1,2	32,0/32,0**
Ce	27,0	167,0	76,0	31,8	1,3	52,0/70,0**
Pr	2,9	17,0	7,9	3,0	1,0	6,8/7,9**
Nd	10,9	59,6	28,6	10,1	1,1	24,0/31,0**
Sm	2,6	13,7	6,5	2,4	1,1	5,5/5,7**
Eu	0,1	2,8	1,2	0,5	1,2	0,94/1,2**
Gd	3,4	13,4	7,5	2,1	1,7	4,0/5,2**
Tb	0,5	1,9	1,1	0,3	1,4	0,69/0,8**
Dy	3,0	10,9	6,0	1,6	1,5	3,6/3,6**
Ho	0,6	2,2	1,3	0,3	1,2	0,92/1,0**
Er	1,6	6,0	3,3	0,8	1,7	1,7/3,4**
Tm	0,2	0,8	0,5	0,1	1,0	0,42/0,5**
Yb	1,1	4,4	2,2	0,7	1,0	2,0/3,1**
Lu	0,1	0,7	0,3	0,1	0,9	0,3/0,5**

*среднее для осадочных пород континентов (Григорьев, 2009); **среднее для сланцев американской платформы, образец NASK (Gromet et al., 1984)

В ходе миграции вещества из области питания в бассейн седиментации происходит фракционирование терригенного материала как по размерному и минеральному составу (результат отражается в пространственной структуре донных осадков и дифференциации минерального состава), так и по химическому составу. В качестве показателя степени фракционирования элементов использовались сравнение нормированных относительно реперного скандия содержания химических элементов в пробе, выражаемое в виде коэффициента фракционирования K_{ϕ} :

$$K_{\phi} = (x_i/Sc)_{\text{объект}} / (x_i/Sc)_k,$$

где x_i – содержание i -ого элемента в донных осадках и его среднее содержание континентальных осадочных породах (Балашов, 1976). Реперным выбран Sc, поскольку он химически инертен в зоне гипергенеза (Перельман, 1989).

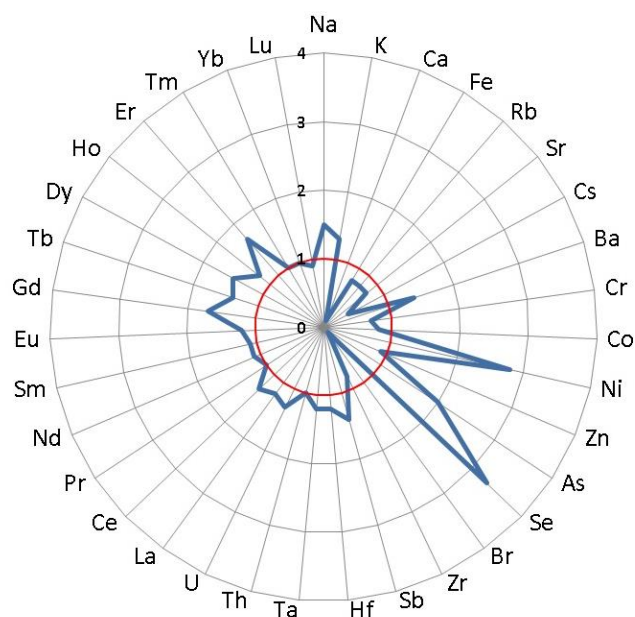


Рисунок - 2. Коэффициенты фракционирования элементов, относительно их среднего содержания в осадочных породах континентальной коры

При анализе данных Таблицы 1 и Рисунка 2 были сделаны следующие выводы:

- фракционное обогащения относительно терригенного источника ($K_{\phi} > 1$) выявлено для Na, K, Ba, Ni, As, Se, Sb, Ta, U, Hf, La, Ce, Eu, Er, Gd, Tb, Dy и Ho;
- осадки губы обеднены Ca, Fe, Sr, Rb, Cs, Co, Cr, Zr, Br, Lu относительно терригенного источника ($K_{\phi} < 1$);
- устойчивость к фракционированию относительно терригенного источника проявили Zn, Th, Nd, Sm, Pr, Tm, Yb ($K_{\phi} \approx 1$).

Стоит отметить, что наименьший K_{ϕ} выявлен для Ca, Br, Cs и равен 0.1, 0.1 и 0.4 соответственно.

По результатам расчета коэффициентов парной корреляции было установлено, что большинство химических элементов с повышенными содержаниями имеют устойчивую положительную связь с железом и органическим углеродом, что так же подтверждается результатами кластерного анализа (группа II) (Рисунок 3).

Низкое содержание Ca может объясняться практически полным отсутствием карбонатных минералов в осадках, а также раковинного детрита. Что касается Br, то, несмотря на его устойчивую связь с органическим углеродом ($r=0,53$) и высокие концентрации последнего, его содержание на

порядок ниже относительно осадочных пород континента. Развитие в исследуемом районе морского фитопланктона – одного из основных источников Br, ограничено малыми глубинами, низкой соленостью и крайне высокой мутностью воды.

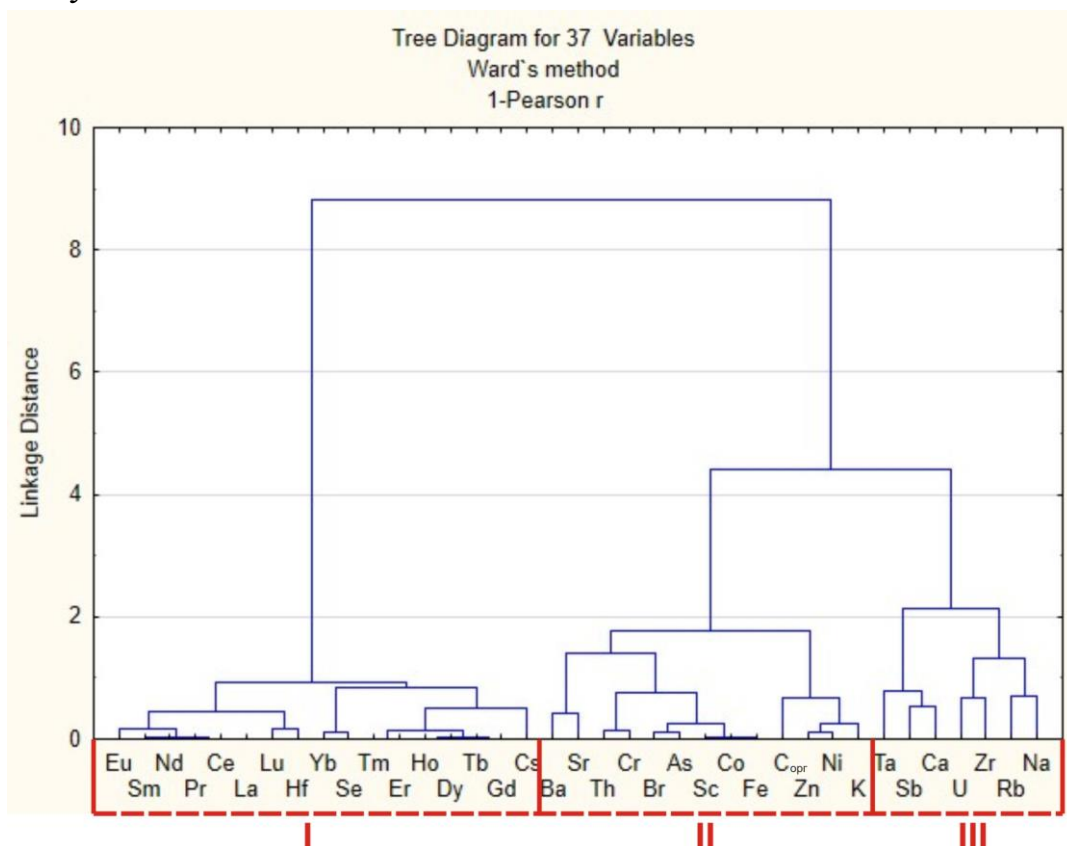


Рисунок - 3. Кластерная дендрограмма

Таким образом, проведенный анализ содержания химических элементов в современных донных осадках губы Буор-Хая относительно их содержаний в осадочных породах континентальной коры позволил установить специфику, выражающуюся в более высоких концентрациях Na, K, Ba, Ni, As, Se, Sb, Ta, U, Hf, La, Ce, Eu, Er, Gd, Tb, Dy, Ho и низких Ca, Br и Cs. Основными факторами, контролирующими накопление химических элементов, являются исходный состав терригенного материала, а также сорбционная способность гидроокислов железа и органического углерода.

Второе защищаемое положение

В пространственном распределении химических элементов в донных осадках губы Буор-Хая проявлена субмеридиональная латеральная зональность, обусловленная разными источниками осадочного материала в восточной и западной частях губы, а также гидрологическим разделом в осевой части, выполняющим барьерную функцию и ограничивающим перенос и обмен веществом. (Обоснование положения приводится в главах 3-4 диссертации)

Рисунок 4 а,б показывает внедрение в губу клина соленых и относительно холодных шельфовых вод. В поверхностном горизонте их перенос ограничивается мощным пресноводным стоком. Распресненные воды прослеживаются по всей акватории губы и за ее пределами в Янском заливе. В придонном горизонте соленые воды распространяются в центральной части губы. Придонный транспорт вещества от дельты на восток блокируется подтоком морских вод из северо-восточной части губы. Подобное взаимодействие стоковых и шельфовых вод выявлено и в зимний период, однако здесь на фоне низкого зимнего стока р. Лена шельфовые воды занимают большую часть губы. Распределение температуры вод губы четко коррелирует с изменениями солености, как это видно по распространению соленых и холодных шельфовых вод (Рисунок 4в,г).

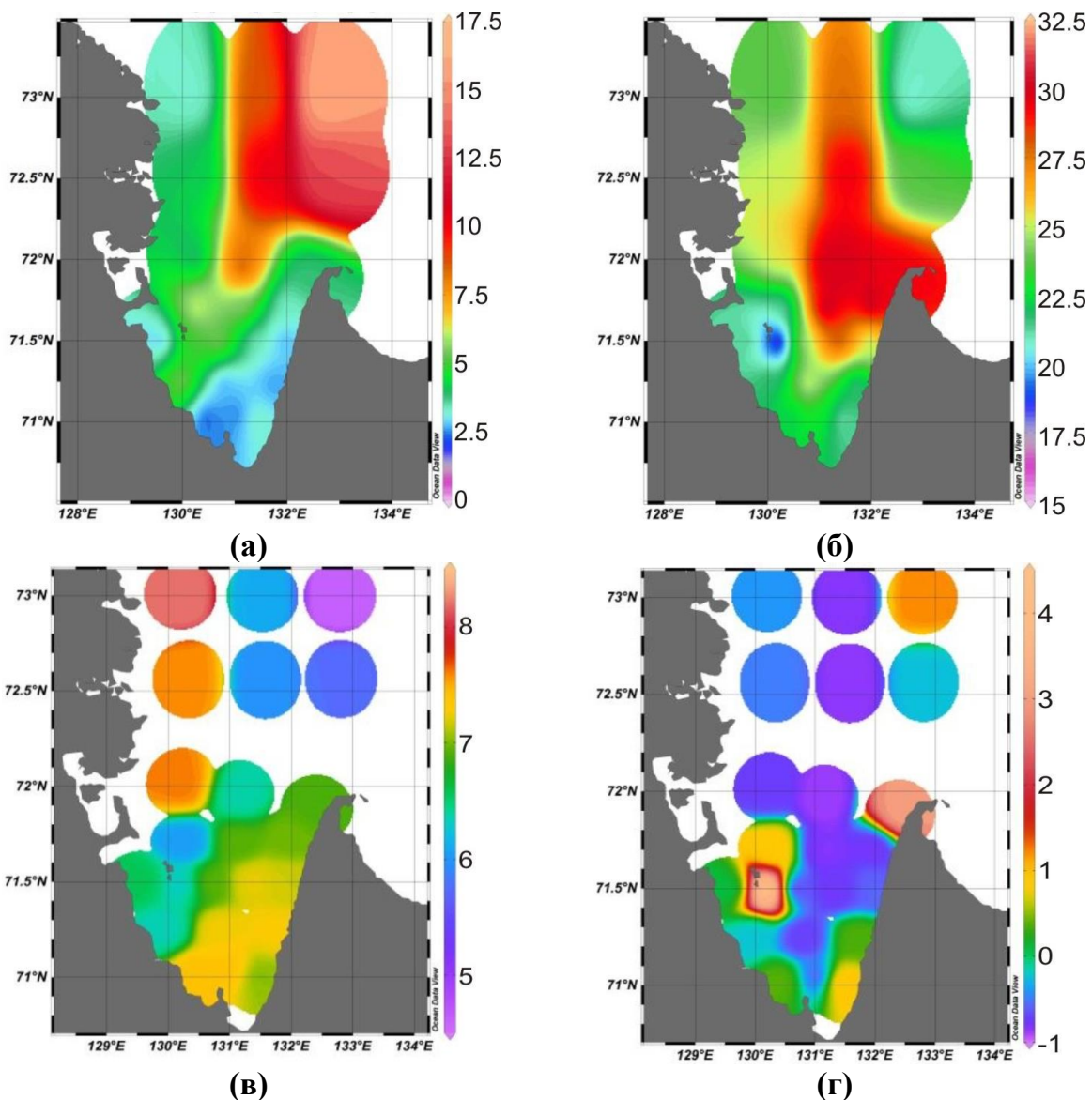


Рисунок - 4. Распределение солености (а, б) и температуры (в, г) поверхностных (а, в) и придонных (б, г) в сентябре 2000 г.

В зоне подпора вод вдоль внешнего края авандельт идет осаждение песчаных фракций твердого стока р Лена. Мористее этой зоны в транзите остаются алевритово-пелитовые частицы, а преодолевает данный гидрологический барьер только пелитовый материал, преимущественно средне-тонкодисперсной размерности (Аникиев и др., 1990; 2001; Биогеохимия океана, 1983; Гордеев, 1983; 2011; Лисицын, 1993; Eisma, 1988; Sholkovitz, 1990). В результате, происходит фракционирование вещественного и размерного состава осадочного материала, что находит отражение в формировании специфической пространственной структуры минералого-геохимической специализации донных осадков.

По содержанию тяжелой минеральной подфракции можно рассуждать об интенсивности гидродинамических процессов. Максимальный ее выход зафиксирован в зоне подводных береговых баров вдоль морского края дельты р. Лена, что объясняется мелководностью рельефа и характером течений. Самое низкое содержание тяжелой подфракции наблюдается в осадках эрозионно-аккумулятивной подводной равнины, где воздействие подошвы волн на дно возможно только в периоды сильных штормов. На дне залегают дисперсные осадки, а сама поверхность биотурбирована бентосными организмами (Рисунок 5, ст. 12). На подводном береговом склоне п-ова Буор-Хая с песчано-алевритовой литологической структурой осадков выход тяжелой подфракции вновь возрастает, указывая на усиление гидродинамических процессов. Здесь оно контролируется волновым воздействием, ослабевающим вниз по склону.

На широтном разрезе видно, что состав минералов тяжелой подфракции на западе и востоке губы различен, поскольку зависит от вещества области сноса и динамики вод. Осадки подводного берегового склона на востоке губы (Рисунок 5, ст. 13) выделяются наиболее низким содержанием амфиболов, пироксенов, эпидота и циркона в противоположность повышенному содержанию здесь ильменита, циркона, граната (см. также ст. 14, 15). Основной состав тяжелой подфракции авандельты р. Лена представлен амфиболами, пироксенами, гранатом, эпидотом при редуцировании вклада циркона до 1.2%, а ильменита до 0% (ст.42).

Осадки выделяются относительно неоднородным минералогическим составом тяжелой подфракции. В пользу этого свидетельствует пространственная изменчивость его количественной и качественной структуры, указывающей на интенсивную гидродинамическую дифференциацию частиц по гидравлической крупности. Данное обстоятельство нашло свое отражение в формировании четырех минералогических ассоциаций: 1) гранат-ильменитовая; 2) эпидот-амфиболовая; 3) амфибол-слюдистая; 4) слюдисто-амфиболовая.

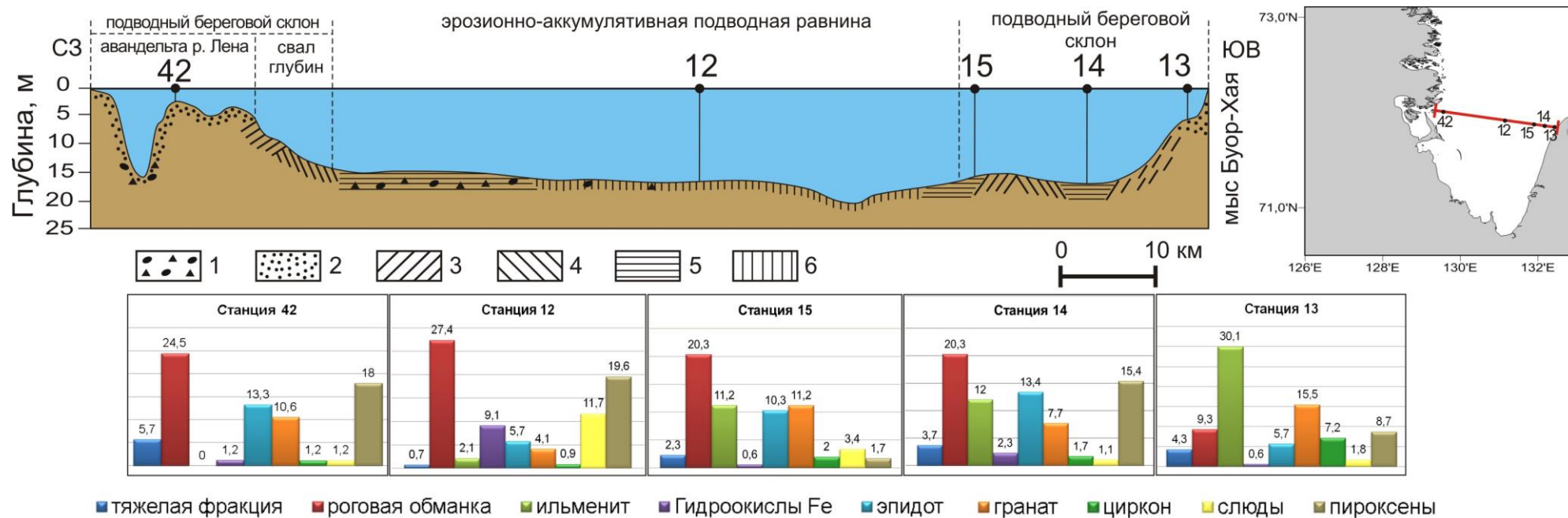


Рисунок - 5. Изменчивость литологического и минералогического состава донных осадков на широтном разрезе через внешнюю часть губы.

Донные осадки: 1 - гравийно-галечный материал ледового разноса и стоковых эрозионных каналов, 2 - песок среднезернистый, 3 – песок алевритовый, 4 – алеврит песчаный, 5 – алеврит пелитовый, 6 – пелит алевритовый

Данные особенности гидродинамического режима акватории губы также влияют и на пространственное распределение элементов в донных осадках.

По уровню содержания химические элементы подразделены на две группы; главные элементы, формирующие основной химический состав донных осадков (содержание $>0,1\%$) и микроэлементы (содержание $<0,1\%$).

Железо. В структуре пространственного распределения Fe прослеживается приуроченность относительно повышенных значений к осадкам западной части губы. Относительно кларка (KC_{Fe}) в осадочных породах континентов (Григорьев, 2009) максимальное содержание железа здесь в 1.6 раза выше. Среднее сопоставимо с KC_{Fe} . Области высокого содержания отмечены в осевой части губы и на юго-западе. Наиболее низкое содержание железа в песчано-алевритовых осадках вдоль п-ова Буор-Хая (примерно в 4 раза ниже KC_{Fe}). Все перечисленное указывает на необычность распределения железа, в частности на его невысокое (в авандельтовых осадках) и даже низкое (вдоль полуострова Буор-Хая) содержание. Закономерно высокое содержание только в дисперсных осадках осевой части губы (Рисунок 6).

Натрий. Крайние значения диапазона содержания этого элемента $1\div 2,71\%$ ($\bar{x}=1,93\%$). Среднее содержание натрия в 1.5 раза выше KC_{Na} (доминирующая площадь дна губы), максимальное - в 2 раза (придельтовая часть). Все это говорит об обогащении осадков данным элементом. Подобный характер распределения может связываться с процессами катионного обмена, а именно с увеличением десорбции катионов Na^+ на поверхности глинистых и коллоидных частиц по мере роста солености вод в области смешения (Лапин и др., 1988; Тищенко и др., 1987).

Кальций. Наблюдается обеднение осадков Ca, что следует из нормирования его значений к KC_{Ca} . Относительно этого показателя среднее содержание ниже в 8 раз, а минимальное и максимальное – соответственно в 32 и 5 раз. Наименьшие значения обнаружены в осадках центральной и восточной частей губы, что может объясняться практически полным отсутствием карбонатных минералов в осадках, а также раковинного детрита. Рост содержания Ca наблюдается вдоль морского края дельты р. Лена. Максимальные значения – напротив устья Трофимовской протоки, что косвенно указывает на обогащение хемогенным кальцитом.

Калий. Диапазон содержания варьирует от 0,15 до 10,0 % ($\bar{x}=2,87\%$). Относительно KC_K среднее значение в осадках в 1.3 раза выше. Максимумы содержания (превышают KC_K в 4.4 раза) характерны для тонкозернистых осадков осевой части губы, где его содержание регулируется вкладом глинистых частиц, наиболее способных к дальней водной миграции, а для

периферийных западной и особенно восточной частей губы – минимумы (ниже $КС_K$ в 15 раз).

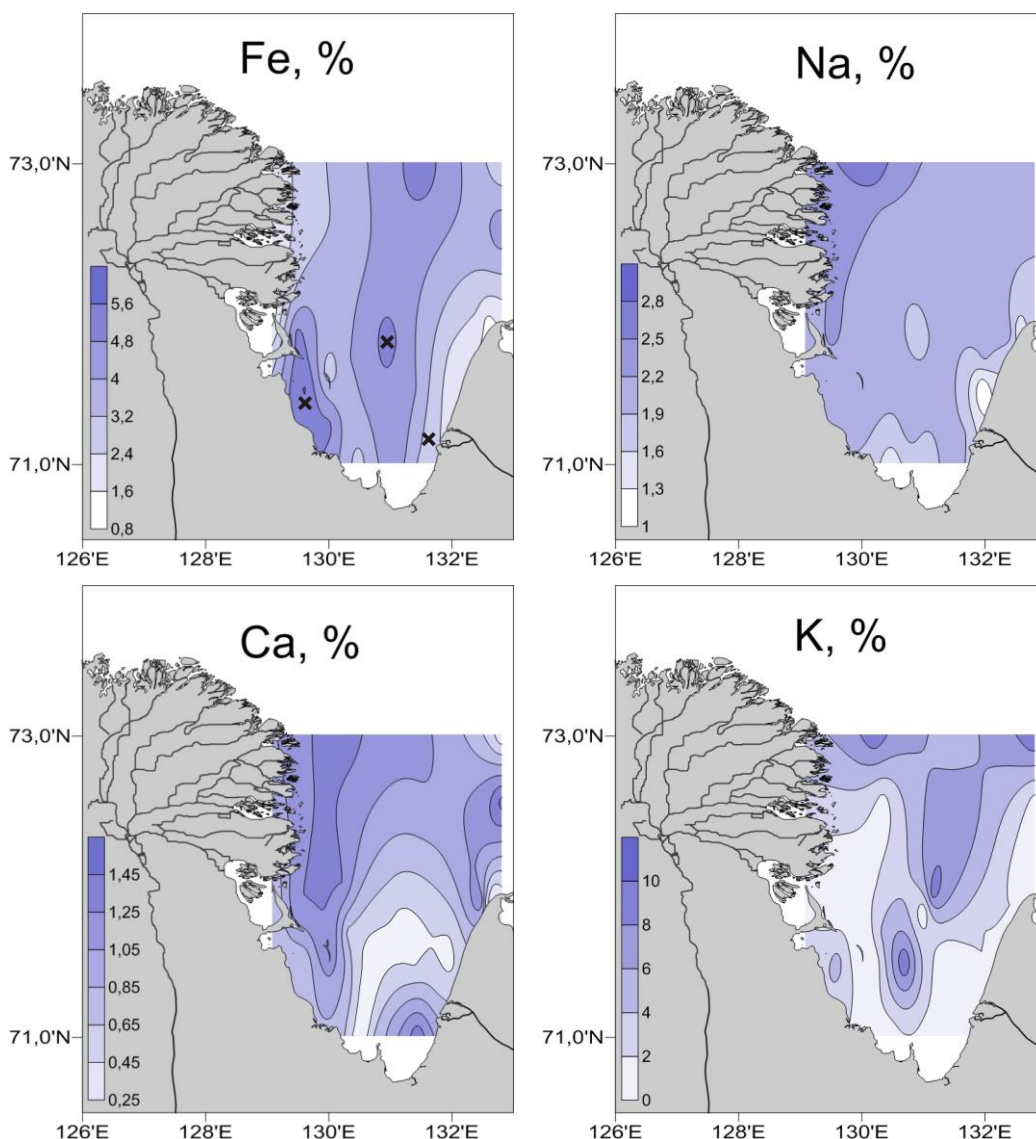


Рисунок - 6. Структура пространственного распределения в донных осадках Fe, Na, Ca, K (знаком «x» обозначены участки обнаружения Fe-Mn конкреций/корок)

На различие химического состава донных осадков западной и восточной частей губы также указывает пространственное распределение Ba, Cs, Br, Zr, Hf, As, Sb, Sc, Sr и ряда редкоземельных элементов.

Таким образом, клин соленых низкотемпературных и более плотных шельфовых вод, круглогодично приуроченный к центральной части губы, представляет собой природный гидрологический барьер, ограничивающий придонный транспорт и обмен вещества между западной и восточной частями губы.

Третье защищаемое положение

Среднее содержание органического углерода в терригенных осадках губы Буор-Хая составляет 1,9 %. Максимальные его концентрации (3,6 %)

приурочены к прибрежной зоне дельты р. Лена. Установлена значимая прямая корреляционная зависимость органического углерода с Fe, Cr, Co, Ni, Zn, Sc, Br. (Обоснование положения приводится в 4-й главе диссертации).

Как и в любой другой, в данной области смешения уже на ранних стадиях смешения пресных и соленых вод запускаются физико-химические и биологические механизмы преобразования взвешенного материала и его осаждения. Перераспределяются соотношение форм нахождения и содержание химических элементов, изменяется видовой и численный состав планктонных сообществ, являющихся сорбентом многих элементов. Происходит гравитационная седиментация минеральных частиц и органо-минеральных агрегатов взвешенного материала, образовавшихся в результате флокуляции глинистых и коллоидных частиц с устойчивыми органическими соединениями типа гуминовых и фульвовых кислот, в том числе и при участии микробиальных процессов (Аникиев и др., 2004; Биогеохимия океана, 1983; Лисицын, 1983; Савенко, 1999; Савенко, 2003; Gordeev et al., 1993).

Рисунок 7а демонстрирует пространственное распределение $C_{\text{орг}}$ в донных осадках губы Буор-Хая. Максимальные его концентрации (3,2 %) наблюдаются в западной части губы, в то время как минимальные (0,6 %) – в восточной вдоль преимущественно термоденудационного побережья. Выявленный характер распределения $C_{\text{орг}}$ свидетельствует о различиях в условиях поставки и трансформации органического материала в восточной и западной частях губы. Воды восточной части в настоящее время обеднены $C_{\text{орг}}$ вследствие ограниченной поставки свежего молодого органического вещества. В целом для губы среднее значение содержаний $C_{\text{орг}}$ в донных осадках составляет 1,9 %.

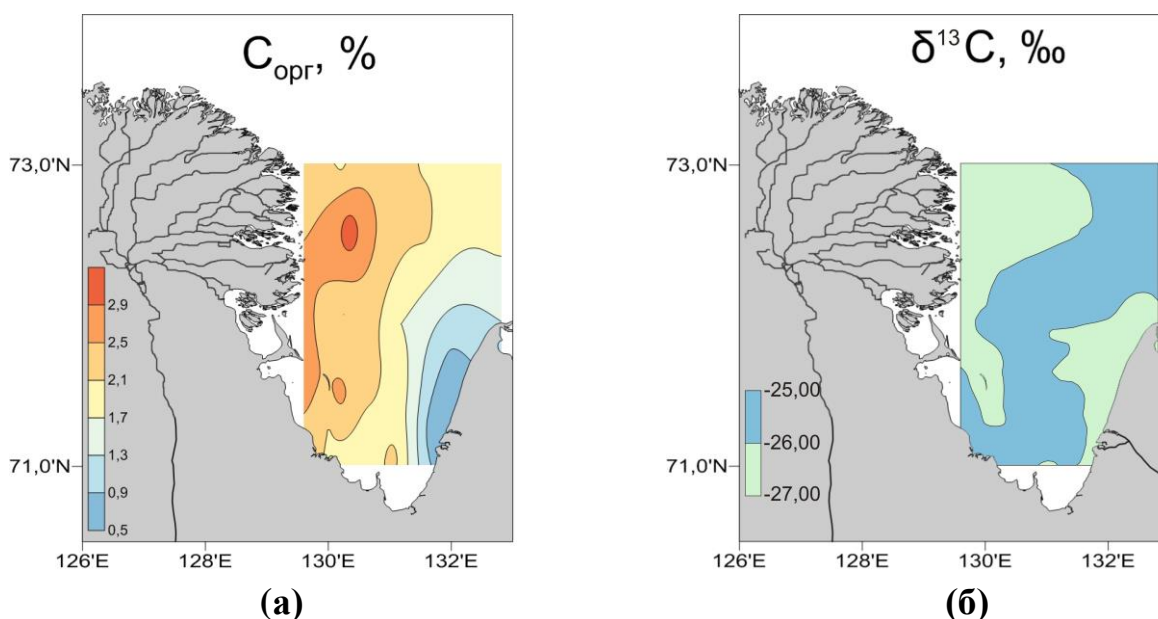


Рисунок - 7. Распределение $C_{\text{орг}}$ в донных осадках (а) и его изотопный состав (б)

Ярко выраженной дифференциации донных осадков по величине $\delta^{13}\text{C}$ не наблюдается, диапазон значений составляет $-25,41\text{‰} \div -26,34\text{‰}$, что указывает на смешанный генезис органического вещества с участием как морской, так и терригенной компоненты.

Участки с наиболее тяжелым изотопным составом $\text{C}_{\text{орг}}$ пространственно совпадают с областью внедрения соленых вод из центральной части моря Лаптевых (Рисунок 7б). Причиной утяжеления изотопного состава $\text{C}_{\text{орг}}$ может являться присутствие в составе органического вещества планктона морского происхождения, для которого характерны значения $\delta^{13}\text{C}$ равные $-23,0\text{‰}$. Значения отношения C/N также указывают на смешанный генезис органического вещества. Наименьшие значения этого показателя ($\text{C}/\text{N}=9,2$) приурочены к восточной части губы, наибольшие ($\text{C}/\text{N}=14,4$) – к западной (Рисунок 8б).

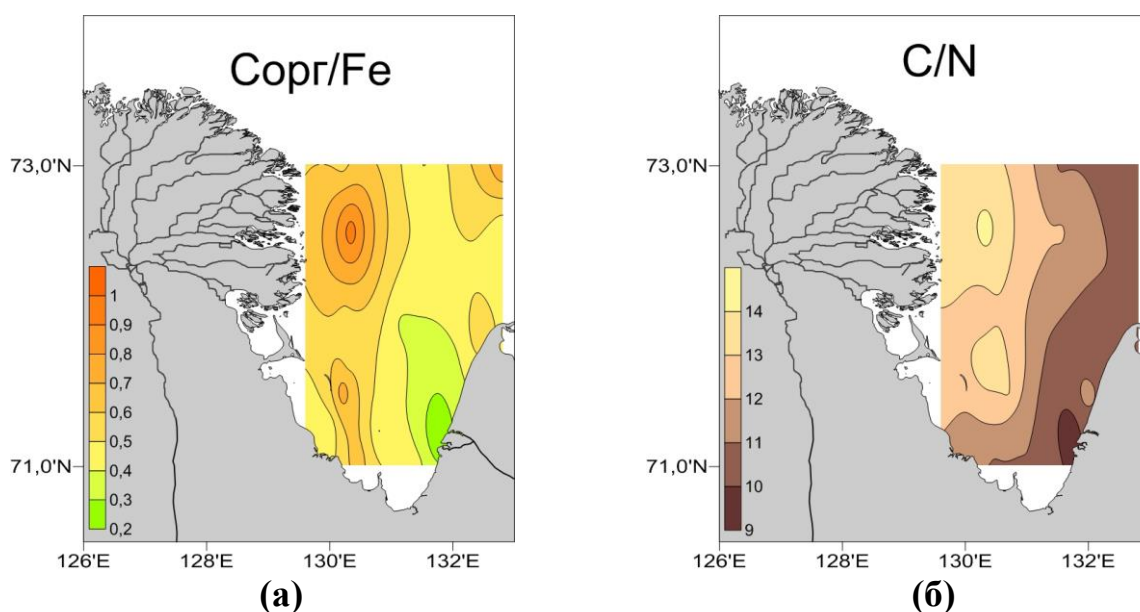


Рисунок - 8. Пространственное распределение отношений $\text{C}_{\text{орг}}/\text{Fe}$ (а) и C/N (б)

Несомненно, такое распределение $\text{C}_{\text{орг}}$ и его изотопного состава должно отразиться на поведении ряда химических элементов, как например железа. Болотные почвы приморских низменностей и низовьев р. Лена характеризуются повышенными концентрациями фракций реакционного железа и органического вещества, преимущественно в виде гуминовых и фульвовых соединений (Gordeev, 1993; Gordeev et al., 2000; 2004). Образующиеся при изменении солености аморфные реакционные гидрогели $\text{Fe}(\text{OH})_3^{\text{I}}$ способны к сорбции растворенного органического вещества и соосаждению (Демина, 1982; Биогеохимия океана, 1983; Sholkovitz, 1976; Barber et al., 2014; Gustafsson et al., 2000;). Поэтому, в осадках придельтовой части губы Буор-Хая формируется область повышенных значений $\text{C}_{\text{орг}}/\text{Fe}$ до

1.0 (0.4-1.0, $x=0.6$), в то время как в осадках противоположной части область невысоких значений ($C_{орг}/Fe=0.2-0.8$, $x=0.5$) (Рисунок 8а).

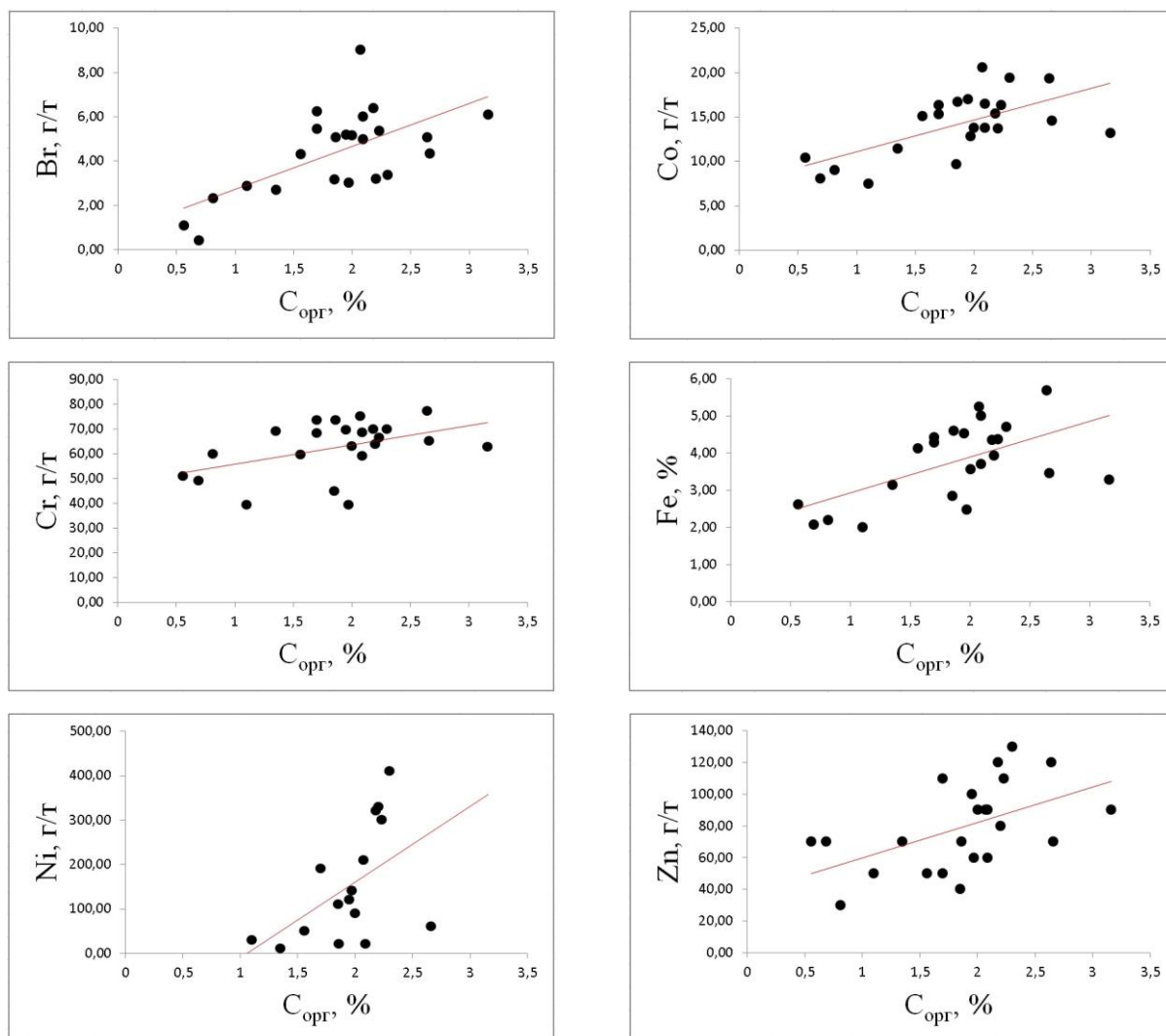


Рисунок - 9. Зависимость концентраций химических элементов от содержаний $C_{орг}$

По результатам корреляционного анализа была выявлена значимая прямая корреляционная зависимость $C_{орг}$ с Fe, Cr, Co, Ni, Zn, Sc, Br (Рисунок 9). Источником Br, вероятно, является кремнистый солоноватоводный планктон, содержание Br в котором достаточно высоко и может достигать 500 мкг/г (Савенко, 2004; Митропольский, 1982). Следовательно, одним из факторов, отвечающих за распределение Br в донных осадках, служит степень распространения соленых вод из центральной части моря Лаптевых и, как следствие, более тяжелый изотопный состав $C_{орг}$. При этом наиболее низкое содержание брома наблюдается в приустьевых областях рек, что закономерно.

Такие элементы, как Ni, Co, Zn, Cr могут осаждаться будучи включенными в состав липидных компонентов планктона, в его карбонатный и хитиновый скелеты, а также в состав фекальных пеллет зоопланктона (Биогеохимия океана, 1983; Стародубцев и др., 1984; Касаткина, 1991). В

пользу данного предположения свидетельствует тенденция увеличения содержания этих элементов к центральной части губы, глубоководные условия и относительно высокая соленость которой, являются благоприятными для развития морского планктона.

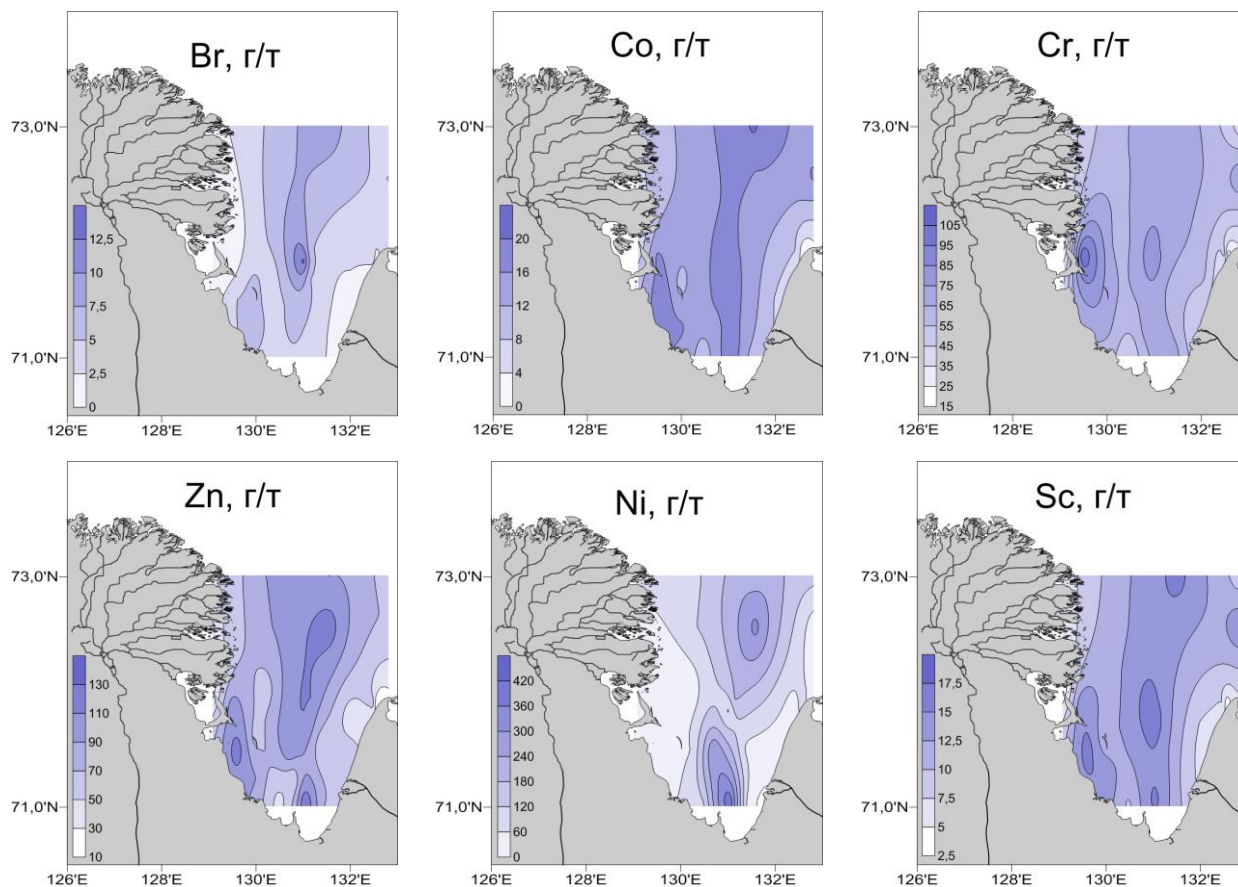


Рисунок - 10. Пространственное распределение химических элементов в донных осадках губы Буор-Хая

Таким образом, основным источником органического вещества в губе Буор-Хая является речной сток Лены и продукты разрушения ледового комплекса западного побережья. Механизмами контроля поведения Fe, Cr, Co, Ni, Zn, Sc, Br в системе «вода-донные осадки» могут быть соосаждение и изменение форм миграции в результате биоаккумуляции, активизирующейся в районе гидрологического фронта (биогеохимического барьера) в центральной части губы. По-видимому, этот процесс является главным фактором контроля характера пространственного распределения химических элементов в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовав геохимические и биохимические аспекты современного осадкообразования в губе Буор-Хая автор пришел к следующим выводам:

1) донные осадки губы Буор-Хая характеризуются повышенными содержаниями Na, K, Ba, Ni, As, Se, Sb, Ta, U, Hf, La, Ce, Eu, Er, Gd, Tb, Dy, Но

и пониженными Ca, Br, Cs по сравнению с их содержанием в осадочных породах континентальной коры;

2) латеральная субмеридиональная зональность минералогеохимической специализации донных осадков обусловлена разными источниками осадочного материала, условиями его водной миграции и седиментации, а также контрастными гидрологическими условиями;

3) клин соленых низкотемпературных и более плотных шельфовых вод, круглогодично приуроченный к центральной части губы, представляет собой природный гидрологический барьер, ограничивающий придонный транспорт и обмен вещества между западной и восточными частями губы;

4) среднее содержание органического углерода составляет 1,9 %, а его изотопный состав указывает на смешанный генезис органического вещества. Главным источником $C_{орг}$, по-видимому, является речной сток Лены и продукты разрушения ледового комплекса западного побережья;

5) главным фактором пространственного распределения некоторых химических элементов в донных осадках, вероятно, является биоаккумуляция, активизирующаяся в районе биогеохимического барьера в центральной части губы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Рубан, А.С. Обстановки современного осадкообразования на подводном береговом склоне губы Буор-Хая (море Лаптевых) / А.С. Рубан, О.В. Дударев, А.К. Мазуров, Е.В. Панова // Известия Томского политехнического университета. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 83-93.

2. Панова, Е.В. Литологические особенности донных осадков и их влияние на распределение органического материала на территории Восточно-Сибирского шельфа / Е.В. Панова, А.С. Рубан, О.В. Дударев, Т. Тези, Л. Брёдер, О. Густафссон, А.А. Гринько, Н.Е. Шахова, И.В. Гончаров, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 94-105

3. Гресов, А.И. Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-Сибирского моря / А.И. Гресов, А.И. Обжиров, А.В. Яцук, А.К. Мазуров, А.С. Рубан // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36, №4. – С. 77-84

Публикации в зарубежных журналах, индексируемых базой данных Scopus

4. Charkin, A.N. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea / A.N. Charkin, M.R. van der Loeff, N.E. Shakhova, O. Gustafsson, O.V. Dudarev, M.S. Cherepnev, A.N. Salyuk, A.V. Koshurnikov, E.A. Spivak, A.Y.

Gunar, **A.S. Ruban**, I.P. Semiletov // The Cryosphere. – 2017. – Vol. 11. – Is. 5. – P. 2305-2327.

Прочие издания

5. Рубан, А.С. Особенности происхождения органического вещества донных осадков юго-восточной части моря Лаптевых / А.С. Рубан // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию Победы советского народа над фашистской Германией, Томск, 6-10 апреля 2015 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. — С. 134-136

6. Dudarev, O.V. Specific features of sedimentology in the outer part of the East Siberian Arctic Shelf / O.V. Dudarev, **A.S. Ruban**, O. Gustafsson, I.P. Semiletov, M. Jakobsson, N.E. Shakhova, T. Tesi, A.N. Charkin // AGU Fall Meeting - 2015 : abstracts, San Francisco, December 14-18, 2015. — Washington: AGU Publications, 2015. — [C43A-0770]

7. Гринько, А.А. Молекулярный состав донных отложений северной части моря Лаптевых / А.А. Гринько, Е.В. Панова, **А.С. Рубан**, С.С. Новиков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 апреля 2016 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. — С. 302-304

8. Рубан, А.С. Современный подводный береговой склон моря Лаптевых: палеорекострукции обстановок литогенеза / А.С. Рубан // Тенденции развития науки и образования. Сборник научных трудов, по материалам XVI международной научно-практической конференции, Самара, 31 июля 2016 г. – Изд. НИЦ «Л-Журнал», – 2016. – Т. 2 – С. 47-49

9. Рубан, А.С. Генетические особенности органического вещества донных осадков северо-восточной части моря Лаптевых / А.С. Рубан // Творчество юных – шаг в успешное будущее: Материалы IX Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – 613 с.

10. Рубан, А.С. Литологические особенности донных осадков юго-восточной части моря Лаптевых / А.С. Рубан, Ю.А. Юринова // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения М.И. Кучина., Томск, 3-7 апреля 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017.

11. Рубан, А.С. Пространственная структура распределения донных осадков в губе Буор-Хая (море Лаптевых) / А.С. Рубан, Е.В. Панова, Ю.А. Юринова // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых) в 2 т. / отв. Ред. Р.Р. Гильмутдинов; Перм. Гос. нац. Исслед. Ун-т. – Пермь, 2017. – Т.1. – С. 163-165.