

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ОСАДКОВ КАК ИНДИКАТОР ИСТОЧНИКОВ ПОСТАВКИ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ОХОТСКОМ МОРЕ**

*Н.А. Николаева, А.Н. Деркачев, И.В. Уткин*

ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, г. Владивосток, 690041; e-mail: [nikolaeva@poi.dvo.ru](mailto:nikolaeva@poi.dvo.ru); [derkachev@poi.dvo.ru](mailto:derkachev@poi.dvo.ru); [utkin@poi.dvo.ru](mailto:utkin@poi.dvo.ru)

Поступила в редакцию 27 ноября 2018 г.

Изучен минеральный состав тяжелой подфракции в поверхностных осадках Охотского моря по двум детальным профилям (Магадан–Курильские о-ва и Шантары–центральная часть Охотского моря) и из Сахалинского залива. Полученные данные были проанализированы с использованием методов многомерной статистики, что позволило выделить основные ассоциации тяжелых минералов, которые показали региональные различия в составе минеральных комплексов морских осадков. Прослежено значительное влияние твердого стока р. Амур на процессы осадконакопления. Установлено, что основное влияние на формирование минерального состава осадков оказали два крупных региональных источника обломочного материала – Амуро-Сахалинская и Курило-Камчатская питающие провинции.

**Ключевые слова:** поверхностные осадки, ассоциации тяжелых минералов, факторный анализ, питающие провинции, Охотское море.

**ВВЕДЕНИЕ**

Минеральный состав осадков является одним из индикаторов, по которому реконструируются условия среды осадкообразования и эволюция древних осадочных бассейнов [5, 36]. Его изучение позволяет получить важную информацию о процессах, которые протекают в бассейнах осадконакопления и на прилегающей суше [1, 4, 5, 12, 16, 22, 30, 35 и др.].

Во многих работах большое значение для познания и генетической интерпретации особенностей распределения обломочных минералов в осадочных толщах и, как следствие, установления роли различных факторов кластогенеза придается выявлению статистических закономерностей корреляционной связи между минералами [4, 17, 28, 33 и др.].

Основная цель представленной работы – показать, насколько информативны ассоциации тяжелых минералов при определении источников поступления обломочного материала и особенностей его распределения на примере донных осадков Охотского моря.

Побережье Охотского моря характеризуется контрастным геологическим строением: имеются существенные различия между южной и восточной частями, с одной стороны, северной и западной частями

ми – с другой. На побережье Курильских о-вов, о-ва Хоккайдо, Камчатки широко развиты неоген-четвертичные вулканические породы известково-щелочной серии (преимущественно андезиты, андезибазальты, базальты, дациты и их туфы) и вулканогенно-осадочные породы [6].

В пределах Западно-Камчатского хребта и на о-ве Хоккайдо известны выходы докайнозойских метаморфических пород [7, 24, 31, 34, 44, 46]. Северо-западное побережье моря морфологически совпадает с мезозой-кайнозойским Охотско-Чукотским вулканогенным поясом, сложенным изверженными породами кислого, умеренно кислого и среднего состава, претерпевшими процессы низких степеней метаморфизма. С ними ассоциируют выходы мезозойских кислых интрузивов [2]. На отдельных участках побережья развиты докайнозойские осадочные и метаморфические комплексы пород.

Основными источниками обломочного материала, слагающего осадки Охотского моря, являются абразия берегов, вулканическая деятельность, а также твердый речной сток. Следует отметить, что при этом огромное количество осадочного материала поступает со стоком реки Амур (25 млн т/год) [9]. Кроме того, длительный зимний период с низкими температура-

ми способствует формированию ледового покрова на большей части акватории моря [20]. Разнос обломочного материала, захваченного припайными льдами в прибрежной зоне, является одним из характерных и важных процессов седиментогенеза в Охотском море [21, 26].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным материалом для данной работы послужили пробы донных осадков, отобранные сотрудниками ТОИ ДВО РАН (при участии авторов статьи) в научных экспедициях, выполненных в Охотском море в 2006–2009 гг. на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (40-й рейс, 2006; 42-й рейс, 2008; 45-й рейс, 2009). Пробы были отобраны по двум профилям: Магадан–Курильские о-ва и Шантары–Центральная часть Охотского моря. По ним было выполнено 100 минералогических анализов. Для получения более полной информации о минеральном составе донных осадков также были привлечены данные авторов (79 анализов) по минералогии осадков из Сахалинского залива, северной части Курильских о-вов и Западной Камчатки, отобранные в более ранних экспедициях на НИС «Дмитрий Менделеев» (13-й рейс, 1977 г.), «Академик М. Лаврентьев» (27-й рейс, 1997; 28-й рейс, 1998), «Академик А. Несмеянов» (21-й рейс, 1992 г.; 25-й рейс, 1993 г.), «Профессор Богоров» (37-й рейс, 1994) [10, 12]. Для более полной характеристики минералогического состава осадков были привлечены также доступные опубликованные данные [8, 26] (рис. 1).

Минералогический анализ выполнялся по стандартной методике [27]: изучалась выделенная с помощью бромформа тяжелая (удельный вес 2.89 г/см<sup>3</sup>) подфракция поверхностного слоя (0–5 см) осадков крупноалевритовой размерности (0.1–0.05 мм) под поляризационным микроскопом в иммерсионных жидкостях. В каждом препарате определялось не менее 300 зерен. Для получения сопоставимых данных производился перерасчет результатов минералогического анализа: из общей суммы исключались трудноопределимые измененные зерна, обломки пород, аутигенные и рудные минералы. Сумма оставшихся прозрачных минералов принималась за 100 % и, соответственно, пересчитывалось содержание каждого минерала.

Полученный массив данных по минеральному составу осадков был обработан классическими методами многомерной статистики (корреляционным, Q- и R- модификациями факторного анализа, дискриминантным анализом). При этом использовались авторские разработки программного обеспечения на основе алгоритмов [32], специально разработанных для наук о Земле [14, 15, 39, 40, 42]. Как результат, были

выделены основные парагенетические минеральные ассоциации в осадках и показаны закономерности их пространственного распределения в поверхностном слое осадков Охотского моря.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Формирование состава минеральных ассоциаций осадков определяется, в основном, источниками сноса, условиями подготовки и выноса обломочного материала, процессами осадконакопления в бассейне седиментации, а также физическими свойствами самих минералов [4, 19, 29]. Ведущими из этих факторов являются источники сноса обломочного материала и гидродинамические условия осадконакопления [1, 4, 5, 12, 16, 22, 30, 35 и др.]. В каждом конкретном случае действие ведущих процессов неоднозначно, что отражается в образовании характерных свойств минеральных ассоциаций.

Наиболее полно влияние (взаимодействие) осадкообразующих процессов раскрывается при анализе моделей, основанных на комбинации методов корреляционного и R-факторного анализов [33]. Такая методика позволяет выявить наиболее существенные причины, обуславливающие вариации признаков, помогает вскрыть внутреннюю структуру сложных событий, вести достаточно глубокое изучение основных статистических тенденций и, в конечном итоге, давать достаточно объективную и содержательную интерпретацию природы изучаемых явлений [2, 18].

Основная суть рассматриваемого метода заключается в таком преобразовании первичной матрицы данных, чтобы максимально сжать полученную информацию без существенной ее потери до размеров, обеспечивающих содержательную интерпретацию всего объема первоначальных данных [2, 14, 15]. Для получения более простой структуры матрица факторных нагрузок подвергается еще и варимаксному вращению [14, 39, 40 и др.]. По матрице факторных нагрузок определяется вклад каждой переменной (в нашем случае минерала) в найденный суммарный фактор, а комбинации переменных с максимальными значениями (соответственно, с положительными и отрицательными знаками) в каждом факторе позволяют наметить определенный геологический процесс, обусловивший группировку переменных в рассматриваемую ассоциацию. По степени связи фактора с тем или иным комплексом минералов проводится геологическая интерпретация. В результате можно (с определенной степенью приближения) решить вопрос о влиянии источников сноса на образование минеральных ассоциаций осадков того или иного района и о степени их гидродинамической переработки.

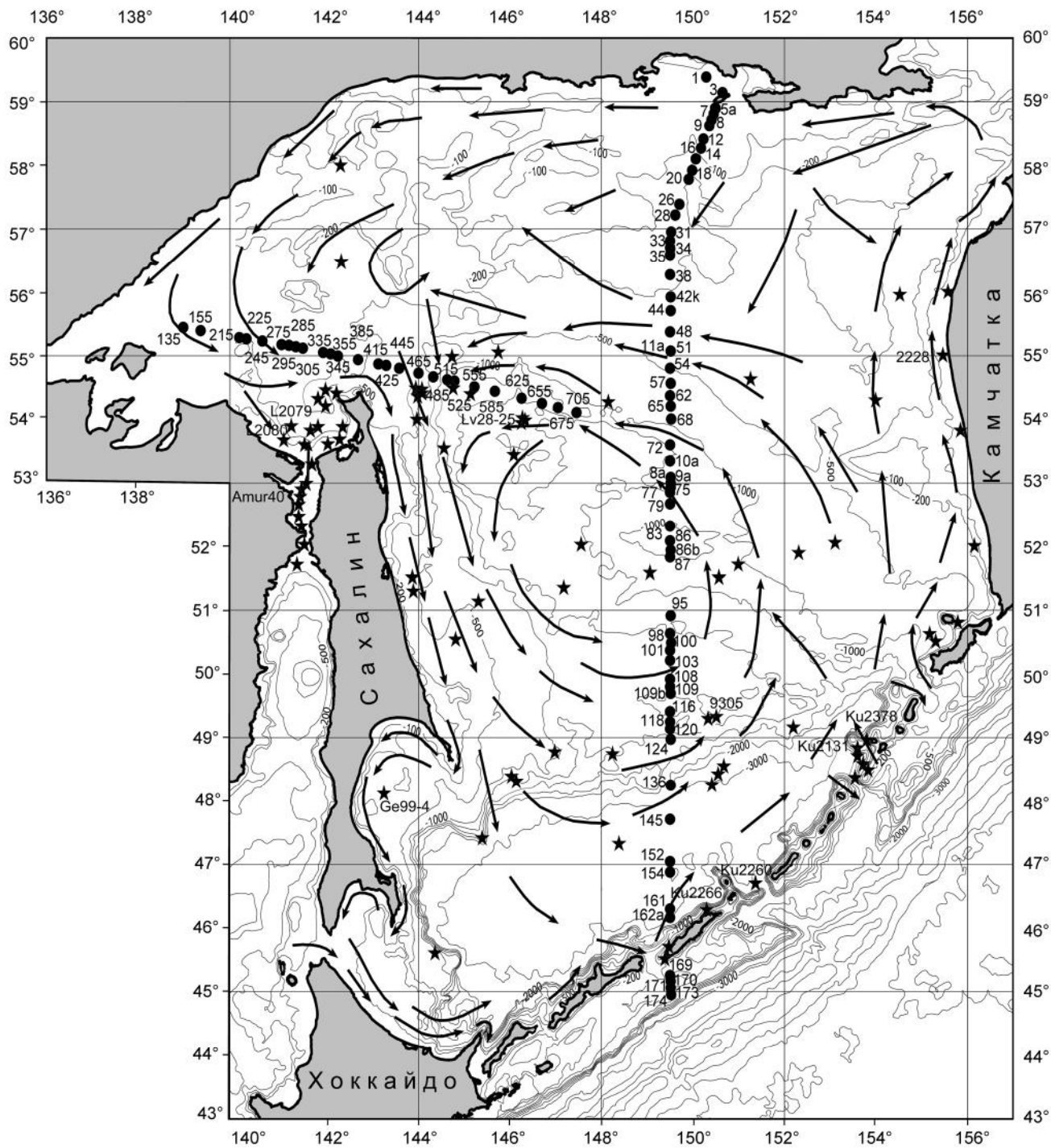


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб поверхностных осадков Охотского моря. Стрелками показаны основные течения, по [13, 23]. Звездочками обозначены станции, ранее изученные авторами [11, 12].

Исходный минеральный состав наиболее представительных проб, которые выделены по максимальным факторным значениям каждого фактора, приведен в таблице. Каждый R-фактор всегда представляет собой противопоставление двух ассоциаций, статистические свойства которых противоположны друг другу, что выражается в противоположных знаках величин, называемых в статистике факторными нагрузками. Факторы при этом выстраиваются в очередь согласно их факторным нагрузкам.

Таким образом, в нашем случае, первый фактор (F1) дает наибольший вклад в суммарную изменчивость выборки (24.53 %) и при этом отображает противопоставление минералов с положительными (клинопироксен, ортопироксен, оливин и бурая роговая обманка) и отрицательными (буро-зеленая роговая обманка, эпидот, гранат, циркон, апатит, сфен, турмалин, анатаз, актинолит) факторными нагрузками (рис. 2). То есть, указанные минералы образуют две четко обособленные парагенетические ассоциации, которые отражают исходный состав пород питающих провинций: первая минеральная ассоциация характерна для вулканогенных пород, вторая – для пород зрелой континентальной коры с широким развитием гранитно-метаморфических пород и их осадочных производных [4, 11, 12, 35]. При этом, наиболее обособленно и независимо ведет себя группа пироксенов и оливина, минералы которой являются одними из основных компонентов вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста, слабо затронутых процессами вторичных изменений.

Второй фактор (F2) с вкладом 10.63 % отражает минеральные ассоциации, объединяющие минералы с разными физико-химическими свойствами относительно степени их устойчивости к выветриванию и плотности. Это группа устойчивых минералов (циркон, сфен, турмалин, анатаз, гранат), которая противопоставляется минералам, характеризующимся меньшей плотностью и, соответственно, большей миграционной подвижностью (слюды, хлорит, роговая обманка, актинолит) (рис. 2). Максимальное проявление указанного фактора прослеживается в осадках Амурского лимана и Сахалинского залива. По существу, второй фактор отображает процессы селективной сортировки минеральных компонентов осадков в зависимости от интенсивности гидродинамики придонных вод. Однако из рис. 2 следует, что резкого обособления указанных выше парагенезов минералов в изученном массиве данных не просматривается (наблюдаются лишь слабые корреляционные связи). Это может свидетельствовать об относительно слабой дифференциации обломочного материала по гидравлической крупности на изученных участках морского дна [12].

Последующие два фактора (с вкладами 7.49 % и 6.36 %, соответственно) отражают минеральные ассоциации в основном смешанного типа, в которых, наряду с ведущими в количественном отношении минералами, свойственными рассмотренным выше ассоциациям первого и второго факторов, отмечается относительно повышенное содержание некоторых акцессорных минералов (табл.). Так, третий фактор отвечает за противопоставление граната слюдам. При этом максимальные значения третьего фактора просматриваются в осадках, прилегающих к западному побережью Камчатки. Здесь в минеральном комплексе, представленном доминирующей группой из пироксенов, наблюдается также относительно повышенное содержание граната, эпидота и актинолита (табл.).

В осадках Охотского моря была прослежена необычная минеральная ассоциация, выраженная пятым фактором F5 (с вкладом 5.01 %) и представленная преимущественно баритом. На рис. 2, а эта минеральная ассоциация занимает независимое положение без значимых корреляционных связей с другими минералами. Она получила локальное распространение только во впадине Дерюгина в районе выхода на морское дно крупных баритовых построек [10, 41], при разрушении которых бариты поступают в окружающие осадки. Они являются, по существу, эдафогенным (не терригенным) источником поставки минералов [25] в осадки.

Таким образом, факторные модели отражают сложный процесс формирования минеральных ассоциаций осадков, обусловленный сочетанием различных источников обломочного материала и неоднородностью гидродинамических условий осадконакопления.

В целом, R-факторный анализ показал, что в Охотском море преобладают две минералогические ассоциации – эпидот-роговообманковая с повышенным содержанием акцессорных минералов и клино-ортопироксеновая с повышенным содержанием оливина и базальтической роговой обманки.

С целью выявления общих, характерных для всего Охотского моря в целом, закономерностей изменчивости в распределении минералов кроме R-модификации факторного анализа была применена еще и Q-модификация факторного анализа. Ее результаты показали хорошее сходство с первой моделью и дополнительные возможности для интерпретации. Сопоставление этих двух моделей, на наш взгляд, подчеркивает объективность выделения минеральных ассоциаций.

Результаты Q-факторного анализа свидетельствуют, что 91.3 % всей изменчивости в распределении минералов приходится на первые два фактора с

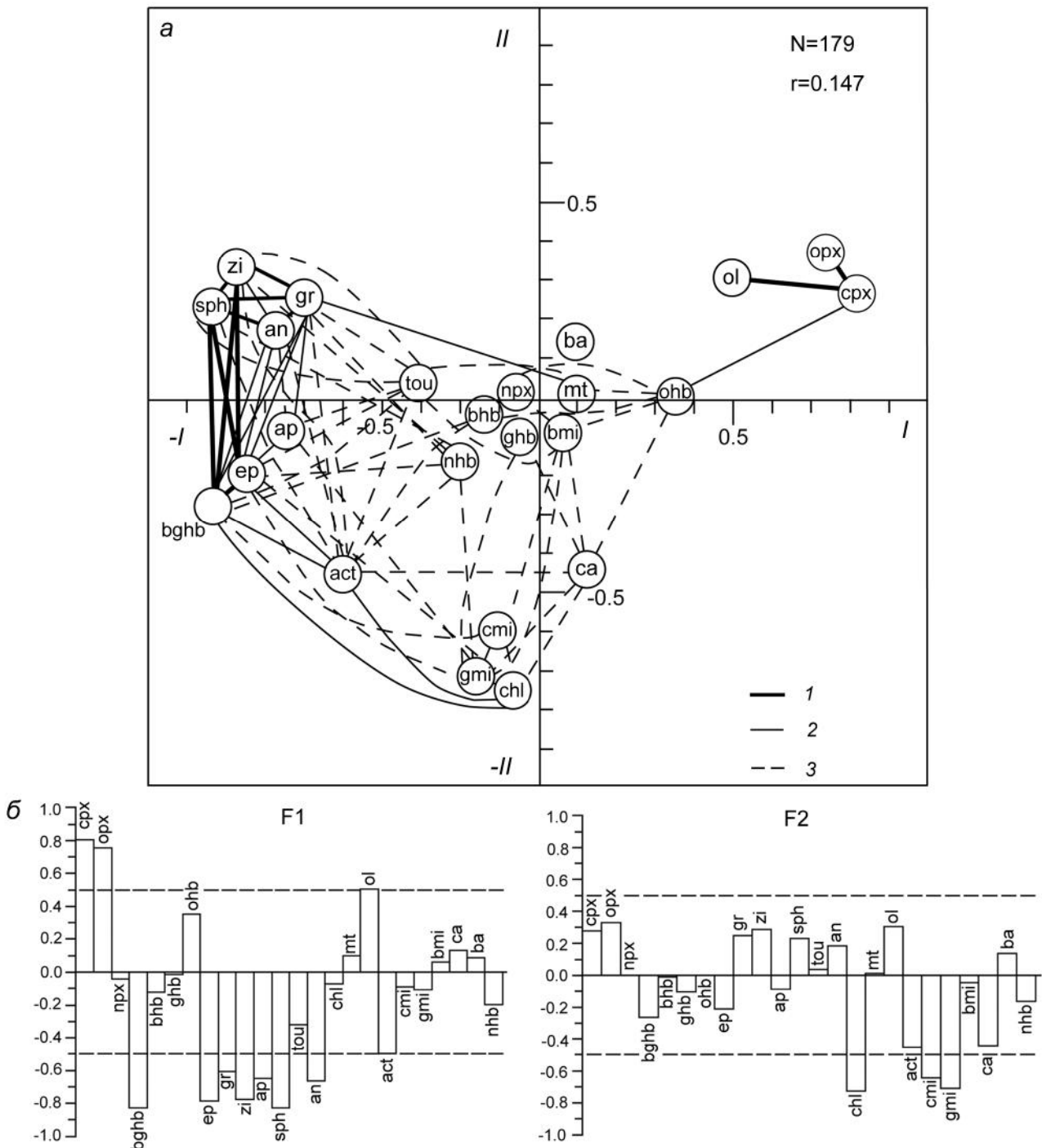


Рис. 2. Результаты статистической обработки данных с помощью R-факторного анализа.

a – R-факторная диаграмма для первых двух факторов, построенная с учетом варимаксного вращения: I, -I – нагрузки первого фактора; II, -II – нагрузки второго фактора; N – количество анализов, r – критическое значение для коэффициента корреляции (95 %-й уровень значимости). Линии корреляционных связей (1–3): 1 – сильные (> 0.5), 2 – средние (0.3–0.5), 3 – слабые (< 0.3); б – Гистограммы R-факторных нагрузок для первого и второго факторов (с варимаксным вращением); индексы минералов: cpx – клинопироксен, opx – ортопироксен, npx – щелочной пироксен, ghb – зеленая роговая обманка, bghb – буро-зеленая роговая обманка, bhb – бурая роговая обманка, ohb – базальтическая роговая обманка, nhb – щелочная роговая обманка, ep – эпидот, gr – гранат; zi – циркон; ap – апатит; sph – сфен; tou – турмалин; an – сумма анатаза, брукита, рутила; chl – хлорит; mt – группа метаморфических минералов (андалузит, силлиманит, ставролит, кианит); ol – оливин; act – актинолит; gmi – слюда зеленая, cmi – слюда бесцветная, bmi – слюда бурая, ca – обломочный карбонат, ba – барит.

Таблица. Минеральный состав (в %) представительных проб, выделенных по результатам R- и Q-факторных анализов.

N ст.	Ku2378	Ku2260	Ku2131	Amur40	L2079	L2080	Ge99-4	2228	3	9305	100	Lv28-25
RFac	F1(max)			F1(min)		F2(max)	F2(min)	F3(max)	F3(min)	F4(max)	F4(min)	F5(max)
QFac		F3(max)	F2(max)		F1(max)							F4(max)
срх	42.82	68.14	20.87	4.47	3.40	8.14	3.98	25.03	6.73	33.06	21.74	5.34
орх	50.62	29.72	77.10	2.24	0.93	1.42	8.57	27.12	2.69	13.86	19.85	2.68
hb	2.33	0.00	2.03	35.78	49.07	33.57	23.99	13.84	47.47	14.17	17.60	4.35
ер	0.00	0.00	0.00	25.56	24.38	27.92	7.47	5.31	5.05	26.39	10.49	0.00
gr	0.00	0.00	0.00	9.27	6.48	12.72	2.28	18.09	0.00	0.60	3.00	0.00
zi	0.00	1.07	0.00	6.07	2.78	7.07	0.00	0.52	0.00	0.31	1.12	0.34
ар	0.00	0.00	0.00	3.51	1.85	1.05	0.57	1.07	1.01	0.60	0.75	0.00
sph	0.00	0.00	0.00	4.79	5.55	3.89	0.02	0.00	0.67	0.60	0.37	0.00
tou	0.00	0.00	0.00	0.32	0.31	0.00	0.00	0.52	0.00	0.01	1.12	0.00
ан	0.00	0.00	0.00	0.96	0.93	0.35	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00
chl	0.00	0.00	0.00	1.28	1.54	0.35	6.86	1.60	0.67	2.54	0.37	0.00
mt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.19	0.00	2.49	0.00	0.00
ol	4.23	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87	0.00
act	0.00	0.00	0.00	4.15	2.16	2.47	1.14	2.67	0.67	2.54	1.50	0.00
mi	0.00	0.00	0.00	1.60	0.62	1.05	43.98	1.04	35.01	1.92	19.85	0.34
ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	0.31	0.37	0.00
ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.95

Примечание. RFac – R-модификация факторного анализа, F1-F5 – R-факторы; QFac – Q-модификация факторного анализа, F1-F4 – Q-факторы. Индексы минералов: срх – клинопироксен, орх – ортопироксен, hb – сумма роговых обманок, ер – эпидот, gr – гранат, zi – циркон; ар – апатит, sph – сфен; tou – турмалин, ан – анатаз, рутил, chl – хлорит, mt – метаморфические минералы, ol – оливин, act – актинолит, mi – сумма слюд, ca – кальцит, ba – барит.

вкладами 47.42 % и 43.91 %, соответственно. Первый Q-фактор (F1) характеризует эпидот-роговообманковую ассоциацию, которая включает также значительную примесь аксессуарных минералов (граната, циркона, сфена и апатита), актинолита и слюд. Максимальные значения первого фактора (рис. 3, а) наблюдаются в Амурском лимане, Сахалинском заливе и на прилегающих участках шельфа и склона северо-восточного Сахалина. Это позволяет предположить, что на формирование данной ассоциации большое значение оказали выносы р. Амур, так как в ее бассейне широко развиты гранитные и гранитно-метаморфические породы и их осадочные дериваты. Характерным представителем данной минеральной ассоциации является станция L2079 (рис. 1, табл.).

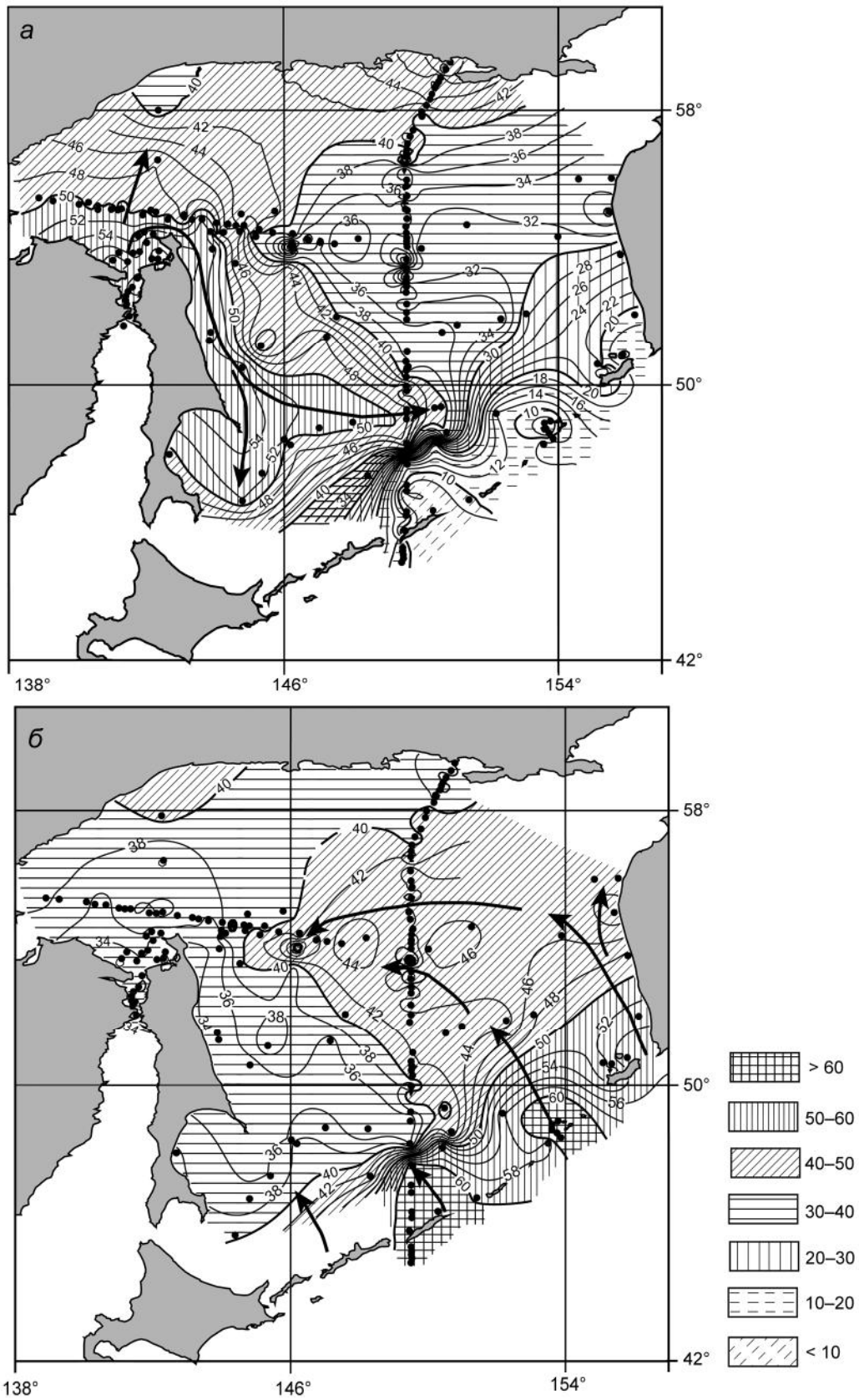
Второй Q-фактор (F2) отображает ассоциацию, в которой преобладают клино- и ортопироксены с небольшой примесью оливина и бурой роговой обманки. Эта минеральная ассоциация в наиболее чистом виде проявлена в осадках, прилегающих к Курило-Камчатской островной дуге (рис. 3, б), где преимущественным распространением пользуются вулканогенные породы разного состава. Характерным представителем данной минеральной ассоциации является станция Ku2266 (рис. 1).

Близкая по составу и происхождению, но с некоторым доминированием клинопироксенов над ор-

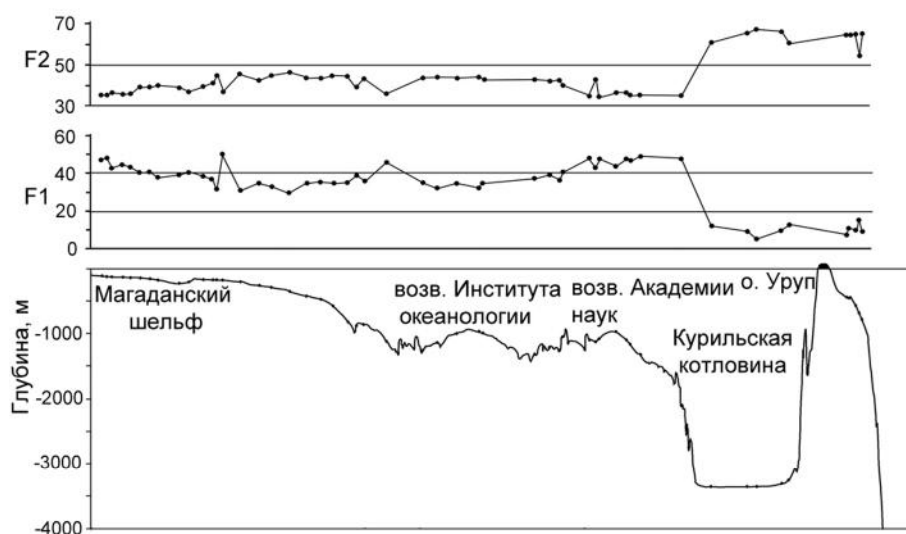
топироксенами, выделяется минеральная ассоциация, определяемая третьим Q-фактором (характерный представитель – станция Ku2260) (рис.1, табл.). На формирование минеральных ассоциаций, объединяемых этими факторами, главным образом, оказали влияние породы прилегающей суши как основной источник поставки обломочного вещества.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственный анализ факторной матрицы позволяет выделить в Охотском море районы с разной степенью проявления указанных выше факторов. Распределения значений первого и второго факторов по разрезу Магадан–Курильские о-ва (рис. 4) и по площади (рис. 3, а, б) показывают, что повышенные значения первого фактора (> 40 %) распространяются до возвышенности Академии Наук, а второго (> 50 %) – развиты в Курильской котловине и у побережья Курильских о-вов и Южной Камчатки. Кроме этого, ясно отмечаются повышенные значения первого и второго факторов в пределах северо-охотоморского участка профиля Магадан–Курильские о-ва. Это можно объяснить тем, что на северо-восточном побережье моря, помимо вулканогенных пород мезозой-кайнозойского Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, распространены мезозойские кислые интрузивы [3], а также на отдельных участках побережья развиты



**Рис. 3.** Распределение Q-факторных значений по площади Охотского моря (в %).  
 а – значения 1-ого фактора, б – значения 2-ого фактора.



**Рис. 4.** Распределение Q-факторных значений по профилю Магадан–Курильские о-ва (в %).

F1 и F2 – значения 1-ого и 2-ого факторов.

докайнозойские осадочные и метаморфические комплексы пород. Это обусловило смешанный характер наблюдающегося минерального состава осадков из этого района.

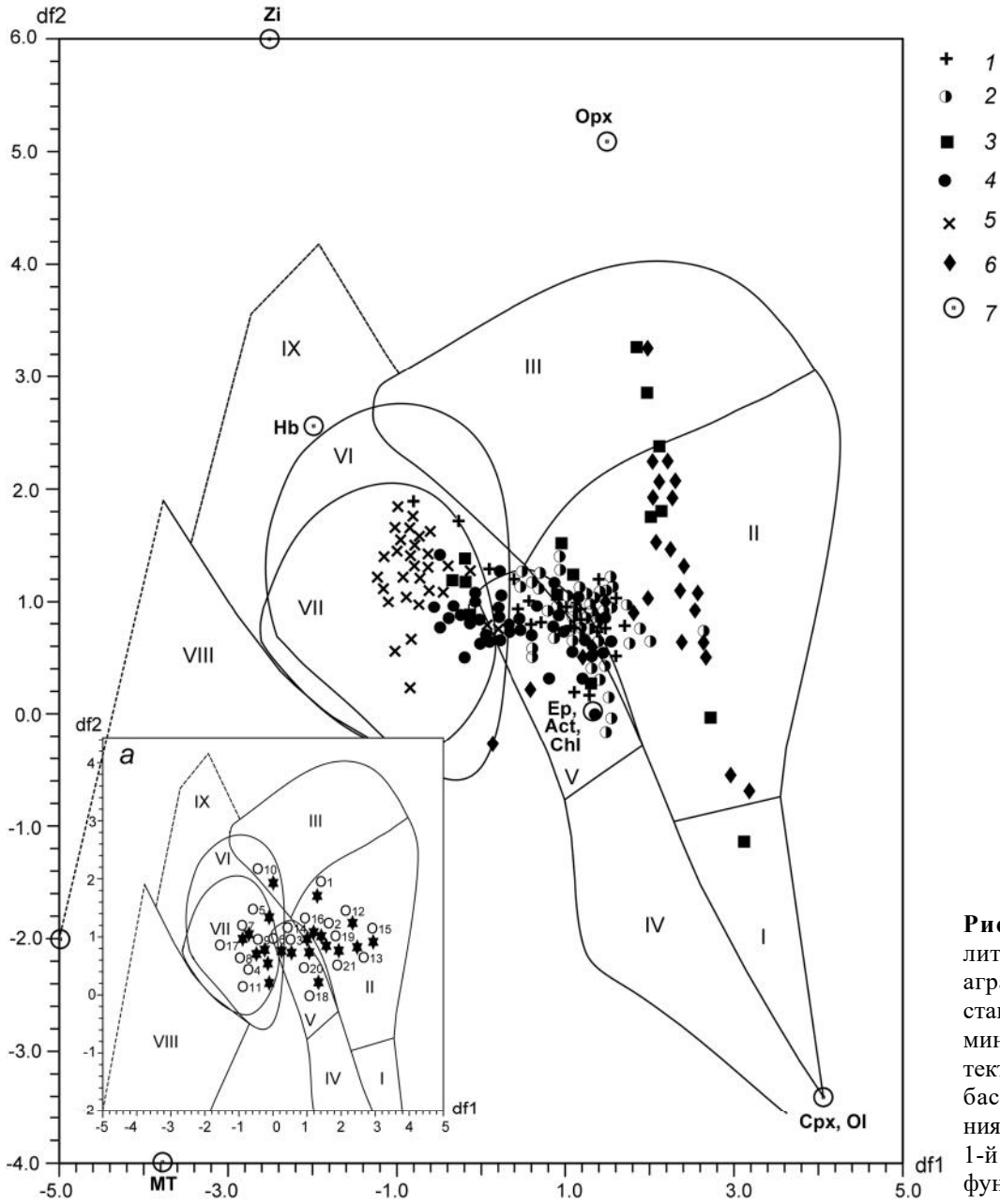
Наглядное представление об источниках поступления обломочных минералов в донные осадки Охотского моря можно получить из рис. 5. В его основу положена разработанная и апробированная нами ранее модель, отражающая зависимость ассоциаций тяжелых минералов от структурно-тектонического положения бассейна осадконакопления [12, 35]. Модель основана на анализе значений дискриминантных функций минеральных ассоциаций осадков по результатам обобщения большого количества фактического материала по минеральному составу донных осадков из различных регионов Мирового океана. Данная модель представляет собой диаграмму, на которой выделены поля, каждое из которых характеризует типоморфные парагенезы минералов, свойственные осадкам, образовавшимся в различных геодинамических обстановках. Для установления источников кластогенного материала в осадках Охотского моря все данные минералогического анализа по двум профилям были вынесены на вышеуказанную диаграмму. Для сравнения были использованы также материалы по более ранним исследованиям [12].

Анализ диаграммы, построенной в плоскости первой и второй дискриминантных функций, показал, что в Охотском море выделяются участки, в осадки которых терригенный материал поступает из различных источников (рис. 5). Главная роль в минеральных комплексах принадлежит, с одной стороны, пироксенам, с другой стороны – буро-зеленым и зеленым роговым обманкам, эпидоту, в меньшей степе-

ни – группе аксессуарных минералов. В зависимости от их соотношения выделяются поля, свойственные, с одной стороны, развитым и зрелым островным дугам, молодым складчатым областям с широким развитием кайнозойских вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, с другой стороны – древним складчатым областям и кратонам древних платформ докембрийского возраста с преобладанием в их петрофонде гранитно-метаморфических и осадочных пород.

Характерной особенностью развитых зрелых островных дуг является интенсивная вулканическая деятельность, сопровождаемая выбросом большого количества пирокластического материала. Типичным примером является Курило-Камчатская островная дуга. Извержения вулканов в этом регионе оказали существенное влияние на формирование минеральных комплексов на прилегающем морском дне, которые представлены двупироксеновым парагенезом (соотношение клино- и ортопироксенов меняется в зависимости от минеральных парагенезов вулканических пород на прилегающей суше) [12]. На диаграмме фигуративные точки станций, прилегающих к северному побережью Курильских о-вов и западному побережью Камчатки, локализуются в полях II и III (рис. 5). Здесь же располагаются точки станций Курильской котловины и даже некоторые точки станций центральной части Охотского моря, что свидетельствует о дальности разноса вулканогенного материала. Отклонение некоторых фигуративных точек от островодужного тренда в сторону роговообманковых и эпидот-актинолит-хлоритовых ассоциаций (в сторону поля V) свидетельствует об участии осадочных и метаморфических пород в формировании их минерального состава.





**Рис. 5.** Индикационная литогеодинамическая диаграмма зависимости состава ассоциаций тяжелых минералов от структурно-тектонического положения бассейна осадконакопления (построена в плоскости 1-й 2-й дискриминантных функций).

Минеральные ассоциации седиментационных бассейнов, сопряженные с геодинамическими обстановками, по [12, 35]: I – юных (океанических) островных дуг, II – развитых и зрелых островных дуг, III – молодых складчатых областей с широким развитием кайнозойских вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, IV – рифтогенеза и внутриокеанических поднятий и островов, V – мезозой-кайнозойских окраинно-континентальных вулканических поясов, VI – докайнозойских складчатых областей с преимущественным развитием осадочных и гранитно-метаморфических пород, VII – древних кратонов и срединных массивов докембрийского возраста, сложенных осадочными и гранитно-метаморфическими породами, VIII – древних платформ; IX – ассоциации с высоким содержанием устойчивых минералов (преимущественно циркона), характеризующие высокоэнергетические обстановки минералогической дифференциации (сепарации); 1–6 – минералогические ассоциации: 1 – северо-охотоморского участка, 2 – центрально-охотоморского участка, 3 – Курильской котловины, 4 – района профиля Шантары–Центральная часть Охотского моря, 5 – Амура-Сахалинской провинции (Сахалинский залив, северо-восточное побережье Сахалина), 6 – Курило-Камчатской провинции; 7 – положение гипотетических точек с максимальным (100 %) проявлением минеральных парагенезов: Hb – роговые обманки, Zi – циркон, Ep – эпидот, Act – актинолит, Chl – хлорит, Срх – клинопироксен, Орх – ортопироксен, ОI – оливин, МТ – метаморфические минералы. На врезке *a* показаны значения дискриминантных функций по минералогическим провинциям Охотского моря, выделенным В.П. Петелиным [26]: O<sub>1</sub> – Тайгоноская, O<sub>2</sub> – залива Шелихова, O<sub>3</sub> – Кони-Пьягина, O<sub>4</sub> – Охотско-Чаломжинская, O<sub>5</sub> – Аяно-Охотская, O<sub>6</sub> – о-ва Ионы, O<sub>7</sub> – Сахалинского залива, O<sub>8</sub> – Северо-Сахалинская, O<sub>9</sub> – Южно-Сахалинская, O<sub>10</sub> – Анивская, O<sub>11</sub> – Хоккайдо, O<sub>12</sub> – Южно-Курильская, O<sub>13</sub> – Северо-Курильская, O<sub>14</sub> – южной глубоководной впадины, O<sub>15</sub> – восточного окончания глубоководной впадины, O<sub>16</sub> – Первая Камчатская, O<sub>17</sub> – Первая Центральная, O<sub>19</sub> – Вторая Камчатская, O<sub>20</sub> – Третья Камчатская, O<sub>21</sub> – Северная.

Заметно, что большая часть фигуративных точек минерального состава локализуется в центральной части диаграммы в полях, характеризующих зрелую континентальную кору. Главная роль в минеральных комплексах принадлежит буро-зеленым и зеленым роговым обманкам, эпидоту, в меньшей степени – аксессуарным минералам. Фигуративные точки этих минеральных групп располагаются в полях V и VII, которые характеризуют мезозой-кайнозойские окраинно-континентальные вулканические пояса, древние кратоны и срединные массивы докембрийского возраста, сложенные осадочными и гранитно-метаморфическими породами. При этом, большая часть точек, характеризующих минеральный состав осадков северо-западной и центральной частей моря (профиль Магадан–Курильские о-ва), располагается в верхней части поля V и на границе с полем II, что свидетельствует о повышенном содержании на этих участках пироксенов наряду с относительно высоким содержанием роговых обманок, эпидота, хлорита, актинолита. Причиной этого является развитие на прилегающей суше мезозой-кайнозойских вулканогенных пород, затронутых процессами вторичных изменений.

Эпидот-роговообманковая минералогическая ассоциация с повышенным содержанием аксессуарных минералов характерна для осадков западной части моря (Амурский лиман, Сахалинский залив и северо-восточный сахалинский склон). При этом основным источником поставки обломочного материала в осадки этой части моря является сток р. Амур. Так как в области водосбора широко развиты гранитно-метаморфические породы, практически все фигуративные точки на диаграмме расположились в пределах поля VII. Ассоциации профиля Шантары–центральная часть Охотского моря локализируются в основном в этом поле, за исключением нескольких конечных точек профиля, которые ложатся в поле II, что обусловлено поставкой течениями вулканокластического материала из Курило-Камчатской питающей провинции.

Для сравнения, на данную диаграмму были внесены расчетные значения дискриминантных функций для средних значений минерального состава провинций, выделенных В.П. Петелиным (соответственно  $O_1, O_2, \dots, O_{21}$ ) [26] (рис. 5, а). Здесь также отчетливо видно, что основными поставщиками обломочного материала в осадки Охотского моря являются развитые и зрелые островные дуги (поле II), мезозой-кайнозойские окраинно-континентальные вулканические пояса (поле V) и древние складчатые области и кратоны докембрийского возраста с преобладанием в их петрофонде гранитно-метаморфических и осадочных пород (поля VI-VII).

Кроме того, анализ пространственного распределения минеральных ассоциаций поверхностных осадков показал, что оно соответствует сложившейся в Охотском море системе течений, при этом главная роль в этом процессе принадлежит Центрально-Охотморскому круговороту течений (рис. 1, 4). Влияние материкового стока (Амуру-Сахалинской питающей провинции) прослеживается на расстояние до 250 км от побережья Сахалина. Конус выноса осадочного материала этого источника протягивается до 900 км вдоль побережья Сахалина и постепенно расширяется к югу и юго-востоку, достигая восточных склонов возвышенности Академии Наук [11].

Юго-восточные и восточные районы моря, прилегающие к северным Курилам и Камчатке, находятся под влиянием восточной ветви Охотморской изогирь (круговорота течений), которая в районе 54–55° с.ш. отклоняется на запад и следует к берегам Сахалина [13, 23]. Благодаря этому область влияния Курило-Камчатской питающей провинции протягивается далеко к западу до впадины Дерюгина. Область смешивания минеральных ассоциаций материкового терригенного и островодужного вулканогенного и вулканогенно-терригенного материала совпадает с центральной частью Охотморского круговорота течений [11].

Таким образом, основными питающими провинциями для осадков Охотского моря являются Амуру-Сахалинская и Курило-Камчатская. При этом также вполне определенно просматривается вклад провинций северо-западного побережья моря.

Необходимо отметить значение процесса ледовой поставки в формировании минералогического состава осадков Охотского моря. Известно, что льдами захватываются не только галька и глыбы, но и более мелкие фракции (IRD – ice rafted debris) [37, 38], которыми обогащаются осадки даже центральной части моря. В результате, изучая минеральный состав осадков, можно установить направление дрейфа льдов и дальность его разноса [43, 45].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе детальных минералогических исследований поверхностного слоя (0–5 см) осадков установлена специфика поставки и перераспределения обломочных минералов тяжелой подфракции ( $\geq 2.89 \text{ г/см}^3$ ) крупноалевритовой (0.10–0.05 мм) размерности в Охотском море.

Основная роль в поставке обломочного материала принадлежит трем источникам – Амуру-Сахалинской, Курило-Камчатской и, в меньшей степени, северо-западно-Охотморской питающим провинциям.

Показано, что перемещение обломочного материала в значительной мере подчинено существующей в Охотском море системе поверхностных течений. Особая роль в этом процессе принадлежит Центрально-Охотоморскому круговороту течений. Об этом свидетельствуют данные по распределению минералогических ассоциаций: значительное расширение площади Амуро-Сахалинской минералогической ассоциации на восток до возвышенности Академии наук и распространение Курило-Камчатской ассоциации далеко на запад, вплоть до впадины Дерюгина.

Локальные поднятия центральной части моря (эдафогенный источник) не оказывают существенного влияния на поступление и характер распределения обломочного материала. Эдафогенный источник уверенно просматривается лишь во впадине Дерюгина по наличию специфической минеральной ассоциации, основным компонентом которой является барит. Однако распространение ее носит весьма ограниченный характер: наблюдается лишь в привершинной части поднятия, носящего название Баритовые холмы [41].

Полученные результаты важны при палеогеографических реконструкциях Охотоморского региона, а также для установления специфики ледовых условий в прошлом. Кроме этого, используя данные по минералогическому составу осадков для отражения обстановки современного осадкообразования, можно также применять их в качестве индикаторов обстановок осадкообразования в палеобассейне.

Авторы выражают признательность всем участникам научных экспедиций за помощь в получении проб осадков. Также авторы благодарны Р.Б. Шакирову за предоставленные пробы осадков по рейсам НИС «Академик М. Лаврентьев» (2006-2009).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ТОИ ДВО по теме № АААА-А17-117030110033-0 и, частично, при финансовой поддержке комплексной программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (тема № 18-1-008).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батулин В.П. Палеогеография по терригенным компонентам. М., Баку: ОНТИ НКТП СССР АЗОНТИ, 1937. 291 с.
2. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М., 1982. 269 с.
3. Белый В.Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.
4. Бергер М.Г. Терригенная минералогия. М.: Недра, 1986. 226 с.
5. Вийдинг Х.А. Роль различных факторов кластогенеза в формировании и эволюции осадочных пород на древних платформах // Обстановки осадконакопления и их эволюция. М.: Наука, 1984. С. 94–103.
6. Геологическая карта северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса (в пределах СССР). 1:1 500 000 / Гл. ред. Л.И. Красный. М.: Мин-во геологии СССР, Мин-во геологии РСФСР, 1964.
7. Геологическое строение Японских островов. М.: Мир, 1968. С. 28–45.
8. Гершанович Д.Е. Донные осадки Шантарского района Охотского моря и условия их формирования // Тр. ГОИН. 1955. Вып. 23. С. 58–110.
9. Гидрология морских устьев рек Дальнего Востока // Тр. ДВНИГМИ. 1989. Вып. 38. 183 с.
10. Деркачев А.Н., Борман Г., Грайнерт Й., Можеровский А.В. Аутигенная карбонатная и баритовая минерализация в осадках впадины Дерюгина (Охотское море) // Литология и полез. ископаемые. 2000. № 6. С. 568–585.
11. Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Горбаренко С.А. Особенности поставки и распределения кластогенного материала в Охотском море в позднечетвертичное время (на основе анализа ассоциаций тяжелых минералов) // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 1. С. 37–52.
12. Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Минералогические индикаторы обстановок приконтинентального осадкообразования западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2010. 320 с.
13. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
14. Дэвис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 574 с.
15. Йереског К.Г., Клован Д.И., Реймент Р.А. Геологический факторный анализ. Л.: Недра, 1980. 224 с.
16. Казанский Ю.П. Введение в теорию осадконакопления. Новосибирск: Наука, СО, 1983. 222 с.
17. Кашик С.А., Мазилов В.Н. Многомерный анализ в литологии. Новосибирск: Наука, 1984. 72 с.
18. Кноринг Л.Д., Деч В.А. Геологу о математике. Л.: Недра, 1989. 208 с.
19. Кухаренко А.А. Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 317 с.
20. Леонов А.К. Региональная океанография. Ч. 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 765 с.
21. Лисицын А.П. Закономерности ледового разноса грубообломочного материала // Современные осадки морей и океанов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 232–284.
22. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
23. Лоция Охотского моря. М.: Изд-во МО СССР, 1974. 335 с.
24. Марков М.С. Метаморфические комплексы и «базальтовый» слой земной коры островных дуг. М.: Наука, 1975. 232 с.
25. Мурдмаа И.О. Эдафогенные обломочные отложения современных океанов // Палеонтология. Морская геология: Междунар. геол. конгр. XXV сес. Докл. сов. геологов. М.: Наука, 1976. С. 156–165.
26. Петелин В.П. Минералогия песчано-алевритовых фракций осадков Охотского моря // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1957. Т. 22. С. 77–138.

27. Петелин В.П. О выборе метода минералогического анализа песчано-алевритовых фракций донных осадков // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1961. Т. 50. С. 170–173.
28. Романова М.А. Современные песчаные отложения Центральных Каракумов. Л.: Наука, 1971. 256 с.
29. Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 534 с.
30. Страхов Н.М. Развитие литогенетических идей в России и СССР. М.: Наука, 1971. 622 с.
31. Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Чубаров В.М. Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2015. 302 с.
32. Уткин И.В. Компьютерная статистическая обработка данных по гранулометрии морских донных осадков для характеристики обстановок современного осадкообразования // Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 96–113.
33. Формации и седиментогенез материковой окраины. Л.: Недра, 1981. 196 с.
34. Хисамутдинова А.И., Соловьев А.В., Рожкова Д.В. Реконструкция источников сноса среднеэоценовых отложений Западно-Камчатского осадочного бассейна (Тигильский район) // Литология и полез. ископаемые. 2016. № 4. С. 359–383.
35. Derkachev A.N., Nikolaeva N.A. Multivariate analysis of heavy mineral assemblages of sediments from the marginal seas of the Western Pacific // *Developments in sedimentology*. Elsevier, 2007. V. 58. P. 439–464.
36. *Developments in Sedimentology. Heavy minerals in use* / Eds. M. Mange, D. Wright. Elsevier, 2007. 1283 p.
37. Dionne J.-C. Sediment load of shore ice and ice rafting potential, Upper St. Lawrence Estuary, Quebec, Canada // *J. Coastal Res.* 1993. V. 9, N 3. P. 628–646.
38. Dowdeswell J.A. Ice-rafted debris (IRD) / V. Gornitz (Ed). *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments* // *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht, 2009. P. 6–12. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3>.
39. Full W.E., Ehrlich K., Klován J.E. EXTENDED QMODEL – objective definition of external end members in the analysis of mixtures // *Math. Geol.* 1981. V. 13, N 4. P. 331–344.
40. Full W.E., Ehrlich K., Bezdek J.C. FUZZY QMODEL – A new approach for linear unmixing // *Math Geol.* 1982. V. 14, N 3. P. 259–270.
41. Greinert J., Bollwerk S., Derkachev A.N., Bohrmann G., Suess E. Massive barite deposits and carbonate mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: precipitation processes at cold seep sites // *Earth Planet. Lett.* 2002. V. 203, N 1. P. 165–180.
42. Klován J.E., Miesch A.T. EXTENDED CABFAC and QMODEL – computer programs for Q-mode factor analysis and compositional data // *Computers & Geosciences*. 1976. V. 1, N 3. P. 161–178.
43. Sakamoto T., Ikehara M., Aoki K., Iijima K., Kimura N., Nakatsuka T., Wakatsuchi M. Ice-rafted debris (IRD)-based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea // *Deep Sea Res. II*. 2005. V. 52. P. 2275–2301.
44. Taira A. Tectonic evolution of the Japanese island-arc system // *Annual Revue of Earth and Planet. Sci.* 2001. V. 29. P. 109–134.
45. Vasilenko Yu.P., Gorbarenko S.A., Bosin A.A., Shi X.-F., Chen M.-T., Zou J.-J., Liu Y.-G., Artemova A.V., Yanchenko E.A., Savenko M.P. 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.
46. Wang Kun-Shan, Shi Xue-Fa, Zou Jian-Jun, Kandasamy Selvaraj, Gong Xun, Wu Yong-Hua, Yan Quan-Shu. Sediment provenance variations in the southern Okhotsk Sea over the last 180 ka: Evidence from light and heavy minerals // *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecology*. 2017. V. 479, N 1. P. 61–70.

Рекомендована к печати Г.Л. Кирилловой

после доработки 18.02.2020 г.

принята к печати 24.09.2020 г.

*N.A. Nikolaeva, A.N. Derkachev, I.V. Utkin*

### **Mineral composition of the sediments as an indicator of supply sources and specific features of clastic material distribution in the Okhotsk Sea**

The mineral composition of the heavy subfraction from surface sediments of the Okhotsk Sea was studied using both two detailed profiles (Magadan-Kuril Islands and Shantar Islands-Central Basin) and data from the Sakhalin Bay. The obtained data were analyzed using the methods of multivariate statistics, which allowed to identify the main associations of heavy minerals and to show regional differences in mineral complexes of marine sediments. A significant effect of solid Amur River discharge on sedimentation processes is traced. The main processes responsible for the formation of the mineral appearance of studied sediments are determined. Two large regional sources of clastic material – the Amur-Sakhalin and Kuril-Kamchatka supplying provinces – had a major influence on the formation of mineral composition of the sediments.

**Key words:** surface sediments, associations of heavy minerals, factor analysis, supplying provinces, Okhotsk Sea.