

УДК 550.423

ИЗМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ СНОСА ГОЛОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАЛИВОВ ОГА И ЦИВОЛЬКИ (АРХИПЕЛАГ НОВАЯ ЗЕМЛЯ) ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА SR, ND, Pb

© 2024 г. И. А. Вишневская^{a, *}, Ю. А. Костицын^a, Т. Г. Окунева^b, Н. Г. Солошенко^b

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук,
ул. Косыгина 19, Москва, 119991 Россия

^bИнститут геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
ул. Академика Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016 Россия

*e-mail: vishnevskaja@geokhi.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 19.07.2023 г.

Принята к публикации 10.08.2023 г.

В работе рассмотрены Sr-, Nd-, Pb-изотопные данные, полученные для двух колонок донных осадков, отобранных в заливах Ога и Цивольки Северного острова архипелага Новая Земля. Изученная толща осадков из залива Ога накопилась за последнюю тысячу лет. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ уменьшается сверху вниз по разрезу от 0.72225 до 0.71995, значение ϵ_{Nd} варьируется от -6.1 до -5.5 . Изотопный состав Pb изменяется в узких пределах: отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 19.107 до 19.139, отношение $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 15.632 до 15.635, отношение $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 38.568 до 38.635. Быстрое уменьшение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ при относительно стабильном изотопном составе неодима и свинца указывает на изменение источника кластогенного материала. Это можно объяснить тем, что в область эрозии ледника и далее, соответственно, в зону осадконакопления сначала поступал материал разрушения пермских глинистых сланцев, а затем – девон-силурийских осадочных карбонатов. Колонка, отобранная в заливе Цивольки, сформировалась за чуть более чем 10 тысяч лет. Эти донные отложения по изотопным отношениям Sr, Nd и Pb разделяются на нижнюю и верхнюю части: до и после 150 см (или ~ 3.5 тыс. лет). В нижней части колонки отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ увеличивается от 0.72055 до 0.72580, значение ϵ_{Nd} остается примерно одинаковым и варьирует около -8.2 . В верхней части наблюдается падение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ до 0.72049 в приповерхностном слое, одновременно с этим увеличивается значение ϵ_{Nd} до -6.4 . На границе этих двух подразделений происходит резкая смена отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ со значения около 18.0 в нижней части на 19.3 в верхней и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ с приблизительно 36.5 в нижней на 38.7 в верхней части разреза. Изменение изотопных характеристик Sr, Nd и Pb, вероятно, является отражением изменений состава пород в области сноса бассейна, который сейчас разрушается ледником. Сравнение с современными источниками, поставляющими обломочный материал в Карское море, показало, что в заливы Ога и Цивольки вещество поступает только с Новой Земли.

Ключевые слова: стронций, неодим, свинец, ледник, источники сноса, реконструкция

DOI: 10.31857/S0016752524010053, EDN: MSVQTE

ВВЕДЕНИЕ

Ледники являются одними из самых эффективных факторов эрозии на Земле, разрушая обширные территории, они оставляют после себя впечатляющие впадины и котловины фьордов. Они также являются очень эффективными переносчиками ила, песка, гравия и валунов на расстояние до нескольких сотен километров от мест их происхождения. Разрушенная порода оседает на большой территории (Benn, Evans, 2014); по литолого-геологическим признакам можно расшифровать природу

этого осадка. Изменение климата, прогрев вод океана и окружающего воздуха увеличивает скорость деградации ледового щита. Особенно это чувствуется в Арктическом регионе. Колебания температуры приводят к увеличению или уменьшению ледового покрова (Benn, Evans, 2014; Dutton et al., 2015; Dyer et al., 2021), что, в свою очередь, отражается на осадках, накапливающихся под его толщей. По мере движения ледника эрозия выводит на дневную поверхность породы различного происхождения и состава, при этом разрушенное вещество эффективно гомогенизируется и обезличивается. Изучая

химические и изотопные характеристики колонок донных отложений, можно проследить смену состава пород, эродируемых в ложе ледника.

Применение изотопных методов при реконструкции источников осадочных пород уже является одним из обычных инструментов геологии. Изотопный состав Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) и Pb ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) в осадочном материале зависит от Rb/Sr, Sm/Nd U/Th/Pb отношений в минеральных фазах пород, подвергаемых выветриванию. Существующая изотопно-геохимическая контрастность континентальных пород дает возможность, например, при изучении вариаций изотопного состава Sr, Nd и Pb в современных и древних обломочных морских отложениях проследить их источники и вариации в пространстве и времени (Innocent et al., 2000; Tütken et al., 2002; Rutberg et al., 2005; Маслов и др., 2018, 2020). Кардинальное изменение или смена тренда вариаций изотопных характеристик осадочной последовательности зачастую свидетельствует о смене источника сноса и/или режима выветривания (Walter et al., 2000; Fagel et al., 2002; Meyer et al., 2011; Goswami et al., 2012; Swärd et al., 2022).

Осадки заливов Ога и Цивольки архипелага Новая Земля, о которых пойдет речь в этом исследовании, образовались в основном за счет разрушения и переработки пород ложа ледников Голубой и Серп и молот соответственно (Rusakov et al., 2022a, b; Taldenkova, 2022). Колонка осадка из залива Ога охватывает интервал в тысячу лет, а из залива Цивольки – 10 тысяч лет. Ранее были рассмотрены результаты геохимического, минерального и литологического изучения колонок АМК-5248 и АМК-5251 (Rusakov et al., 2022a, b); ниже, при интерпретации полученных изотопных (Sr, Nd и Pb) данных мы будем опираться на принятую в этих работах возрастную шкалу и разделения на основные этапы осадконакопления. Наше исследование призвано показать, как на основе изотопных данных можно проследить изменения состава источника сноса и трансформации в режиме существования ледника в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

РЕГИОН, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Заливы Ога и Цивольки расположены на восточном побережье Северного острова архипелага Новая Земля на расстоянии примерно 30 км друг от друга. Заливы находятся во фронтальной части выводных ледников Голубой и Серп и молот соответственно (рис. 1). Вода в заливах практически не подвержена влиянию придонных морских течений (Горшков и др., 1980). Н-О изотопные исследования указывают на преобладание воды, поступающей с Новой Земли, в заливе Цивольки (Дубинина

и др., 2017). Горные породы в зоне распространения ледников входят в состав Новоземельской складчатой системы (Кораго и др., 2022). Самые древние выявленные здесь отложения представлены силур-девонскими известняками, которые постепенно сменяются терригенно-морскими осадочными комплексами карбона и перми (Государственная ..., 1999; Кораго и др., 2022).

Донные отложения отобраны в ходе 63-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2015 г. Колонка АМК-5248 извлечена на точке с координатами $74^{\circ}37.9'$ с.ш., $59^{\circ}18.3'$ в.д. и глубине 129 м, которая располагается во внутренней котловине залива Ога, примыкающей к леднику Голубой. Отбор керна осуществлялся с помощью коробчатого пробоотборника и гравитационной трубки; мощности вскрытых разрезов составили 26 см и 402 см соответственно (рис. 2, Rusakov et al., 2022a). Поскольку гравитационная трубка разрушает самый верхний слой мягких отложений, изученная осадочная толща представляет собой комбинацию двух кернов, коррелированных на основе изменчивости влажности, размера зерен и химического состава осадков. Во внешнем бассейне залива Цивольки взяты два керна отложений (АМК-5251) в точке с координатами $74^{\circ}23.0'$ с.ш., $58^{\circ}52.7'$ в.д. на глубине 120 м с использованием коробчатого пробоотборника (30 см ниже поверхности дна) и гравитационной трубки (472 см ниже поверхности дна). Описание разреза АМК-5251 составлено по обоим кернам (рис. 2 в Rusakov et al., 2022b). На борту судна было проведено предварительное литологическое описание, а “влажные” образцы были сохранены в полиэтиленовых пакетах для транспортировки в береговые лаборатории. Образцы хранились при температуре $\sim 0^{\circ}\text{C}$ (Rusakov et al., 2022a, b).

Результаты радиоуглеродного AMS¹⁴C датирования бентосных фораминифер показали, что осадки колонки АМК-5248 накопились за последнюю тысячу лет примерно с 1090 г. нашей эры (Rusakov et al., 2022a). По распределению изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs установлено, что скорость осадконакопления была неравномерной. Для нижней части разреза (160–402 см, 1090–1530 гг.н.э.) скорость седиментации составила около 0.55 см/год. Отложения среднего участка керна (100–160 см, 1530–1600 гг.н.э.) накопились при самой высокой скорости 0.86 см/год. Верхняя часть разреза (0–100 см, 1600–2015 гг.н.э.) характеризуется наименьшими скоростями осадконакопления, близкими к 0.2–0.25 см/год. Кроме того, за последнюю 1000 лет несколько раз сменились периоды относительного потепления и похолодания (Rusakov et al., 2022a). Для изотопных исследований было выбрано 8 образцов: по одному для каждой стадии изменения природной среды (потепления/похолодания). Стадии выделялись на

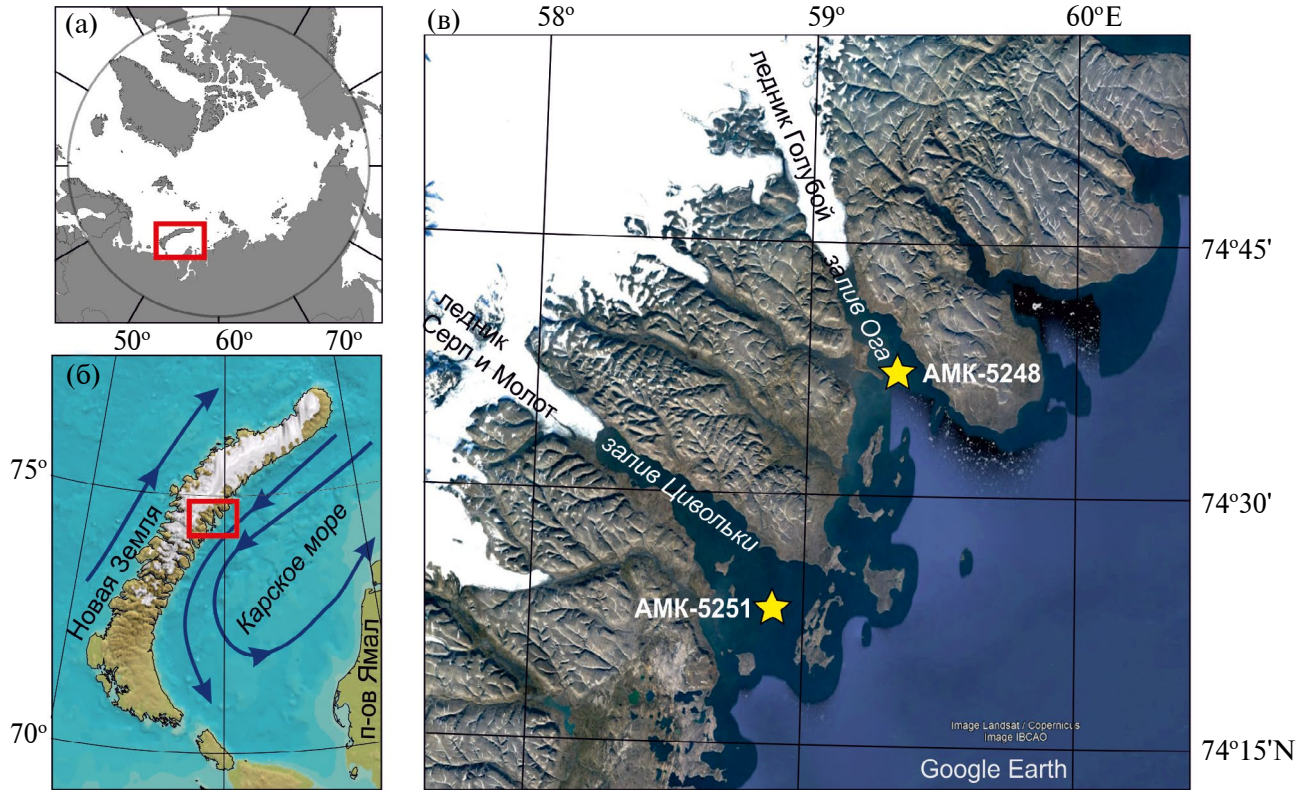


Рис. 1. Место отбора проб. (а) Положение архипелага Новая Земля в акватории Северного Ледовитого океана. (б) Район проведения работ, синими стрелками показаны приповерхностные течения (Горшков и др., 1980, источник карты ИВСАО). (в) Точки отбора проб в заливах Ога (АМК-5248) и Цивольки (АМК-5251) показаны звездочками.

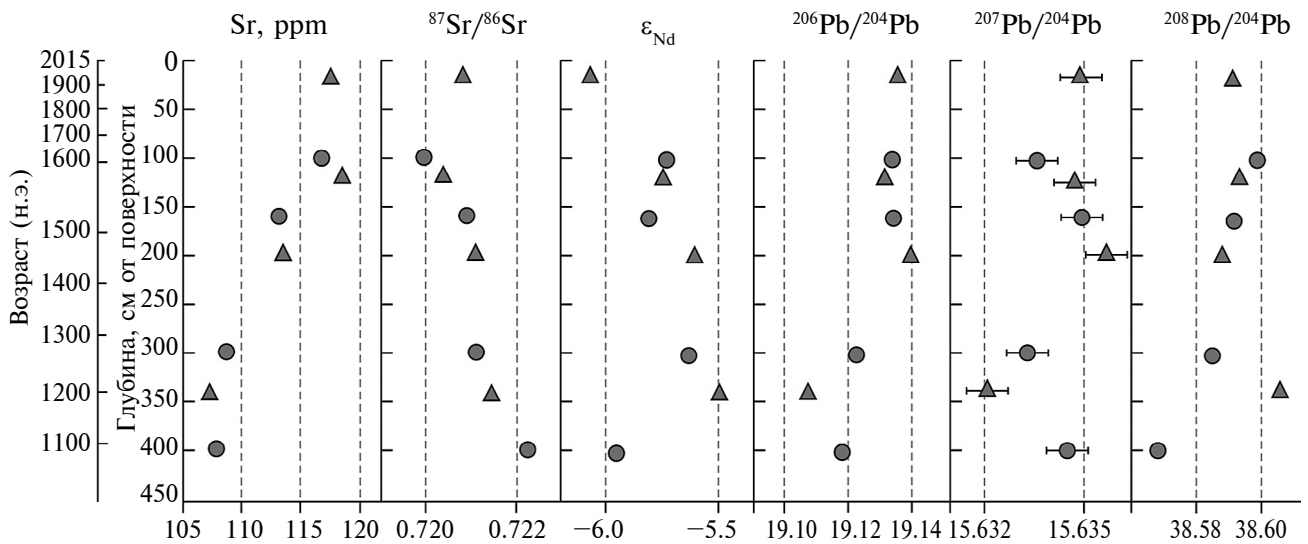


Рис. 2. Распределение содержания Sr и изотопных соотношений Sr, Nd, Pb по колонке осадка АМК-5248 (залив Ога). Кружками обозначены образцы из теплых стадий, треугольниками – из холодных, погрешность измерения ($\pm 2\sigma$) обозначена горизонтальными рисками для отношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, в остальных случаях она не превышает размер знака.

основе изучения литологического, минерального и химического состава донных осадков колонки, а также количественного распределения и видового состава микрофоссилий.

Отложения керна из залива Цивольки (АМК-5251) сформировались за последние 10.6 тысяч календарных лет (тыс. кал. лет, Rusakov et al., 2022b; Taldenkova, 2022). По литологическому составу и набору макро- и микрофоссилий отложения разделяют на три части. Для нижнего (452–235 см, 10.6–4.6 тыс. кал. лет) характерны самые мелкозернистые осадки и рост скорости осадконакопления от примерно 34 до 58 см/тыс. лет. Средний участок керна (235–25 см, 4.6–0.9 кал. тыс.л.н.) сложен более крупной фракцией осадка (вплоть до гравийной), что говорит о более высокой скорости накопления, которая по расчетам составляла 58.7 см/тыс. лет. Здесь же 4.6–3.1 кал.л.н. (325–150 см) меняется химический состав осадков (Rusakov et al., 2022b). Верхние 25 см отложений характеризуются очень низкими скоростями осадконакопления (до 32 см/тыс. лет) и резким увеличением содержания крупнозернистых частиц, вплоть до гравийной размерности, ледового и айсбергового разноразмерности (IRD). Для изотопных исследований из керна АМК-5251 было взято 11 образцов с расчетом равномерно охарактеризовать всю колонку осадка.

Содержание Rb, Sr, Sm и Nd и изотопный состав Sr и Nd изучался на мультиколлекторном масс-спектрометре Triton в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН по стандартной методике с применением смешанных трассеров $^{85}\text{Rb}+^{84}\text{Sr}$ и $^{149}\text{Sm}+^{150}\text{Nd}$. Для оценки воспроизводимости использовали международные стандарты SRM 987 (для Sr) и JNd-1 (для Nd). За период работы среднее измеренное значение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в SRM 987 составило 0.710246 ± 16 , отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в JNd-1 0.512116 ± 12 . Изотопный анализ Pb выполнен высокоточным MC-ICP-MS методом в двух лабораториях. Измерения образцов из залива Ога проведены на масс-спектрометре Neptune в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН, пробы из залива Цивольки – на масс-спектрометре Neptune Plus в лаборатории физико-химических методов ИГГ УрО РАН. Анализировались препараты Pb проб в растворах, трассированных Tl с опорным отношением $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl} = 2.3889$. Точность и правильность получаемых результатов контролировалась путем измерения международного изотопного стандарта Pb SRM 981 и стандарта горной породы AGV-2. За время выполнения настоящей работы значения изотопных отношений Pb для AGV-2 (n = 8) составили: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.871\pm 4$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.621\pm 2$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.548\pm 6$. Значения расширенной неопределенности методики измерений изотопных отношений свинца (включая

Таблица 1. Содержание Rb, Sr, Sm, Nd и изотопный состав Sr и Nd отложений залива Ога

Образец	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\text{SE}^*$	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\text{SD}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\text{SE}^*$	ϵ_{Nd}	T_{Nd}
18–20	113.5	117.5	2.7982	0.720816	0.000018	5.197	25.60	0.12274	0.00001	0.512327	0.000004	–6.1	1.32
100–102	108.3	116.8	2.6872	0.719955	0.000005	5.118	25.15	0.12300	0.00002	0.512344	0.000003	–5.7	1.29
120–122	111.5	118.5	2.7263	0.720381	0.000011	5.137	24.75	0.12551	0.00000	0.512344	0.000007	–5.7	1.33
160–162	111.9	113.2	2.8640	0.720899	0.000008	5.098	25.01	0.12322	0.00000	0.512340	0.000004	–5.8	1.30
200–202	114.1	113.5	2.9123	0.721096	0.000004	4.876	23.30	0.12650	0.00001	0.512350	0.000004	–5.6	1.33
300–302	111.4	108.8	2.9651	0.721108	0.000007	5.167	25.08	0.12457	0.00001	0.512349	0.000005	–5.6	1.31
340–342	112.0	107.4	3.0209	0.721449	0.000005	5.079	24.69	0.12437	0.00001	0.512356	0.000006	–5.5	1.29
400–402	117.4	108.0	3.1518	0.722249	0.000015	5.217	25.45	0.12395	0.00000	0.512327	0.000002	–6.1	1.34

*SE - стандартная ошибка среднего значения единичного измерения.

все стадии химической пробоподготовки и хроматографического выделения): $U(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) = 0.3\%$, $U(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) = 0.1\%$ и $U(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) = 0.1\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изотопные отношения Sr, Nd, Pb в разрезе АМК-5248 весьма однородны (табл. 1, 2, рис. 2). Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ уменьшается сверху вниз по разрезу от 0.72225 до 0.71995 и обратно коррелирует с содержанием Sr, которое, в свою очередь, растет с 107 до 118 ppm. Значение ϵ_{Nd} варьирует по разрезу незакономерно от -5.5 до -6.1. Изотопный состав Pb также изменяется в узких пределах: отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 19.1075 до 19.1398, отношение $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 15.6321 до 15.6358, отношение $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 38.5681 до 38.6358 (табл. 2). Теплые и холодные периоды систематически не различаются друг от друга ни по одной изотопной системе. Диаграммы соотношений некоторых из изученных параметров позволяют разделить колонку на две части: нижнюю (до 300 см, ок. 800 кал. лет назад и старше, образцы 300–302, 340–342 и 400–402) и верхнюю (выше 300 см). Так, на графиках зависимости содержания Sr от отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ точки составов группируются в отдельные области (рис. 3). На диаграмме $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ верхний и нижний участки образуют собственные тренды (рис. 3).

Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ по разрезу АМК-5251 изменяется в широких пределах от 0.72015 до 0.72590 и обратно коррелирует с содержанием Sr, которое, в свою очередь, варьирует от 100 до 137 ppm. Значение ϵ_{Nd} варьирует от -6.4 до -8.4, содержание Nd уменьшается снизу вверх по разрезу от 27 до 22 ppm (табл. 3). Отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ изменяется в интер-

вале от 17.8780 до 19.3408, отношение $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 15.635 до 15.671, отношение $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ от 36.438 до 38.775 (табл. 4, рис. 4). По распределению изотопных составов Sr, Nd и Pb, а также содержания Sr, колонку АМК-5251 можно разделить на две части: верхнюю 0–150 см и нижнюю: 150 см и ниже (рис. 5). В нижней части колонки отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ увеличивается от 0.72055 до 0.72580, значение ϵ_{Nd} остается примерно одинаковым и варьирует около -8.2, содержание Sr уменьшается снизу вверх от 123 до 105 ppm. В верхней части наблюдается падение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ до 0.72049 в приповерхностном слое, одновременно с этим увеличивается значение ϵ_{Nd} до -6.4. Содержание Sr снизу вверх по разрезу этой части колонки растет и достигает максимума (134 ppm) в приповерхностном слое. На границе этих двух подразделений происходит резкая смена отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ со значения около 18.0 в нижней части на 19.3 в верхней и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ с приблизительно 36.5 в нижней на 38.7 в верхней части разреза. При этом внутри каждой части разреза эти отношения остаются постоянными. Отношение $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ плавно увеличивается снизу вверх в нижней части разреза с 15.635 до 15.671 на границе, после чего так же плавно снижается до 15.660. При сравнении разных изотопных соотношений разделение на верхнюю и нижнюю участки разреза проявляются еще ярче.

ОБСУЖДЕНИЕ

Условия ледниковой седиментации определяются динамикой движения ледника, формой ложа (каньона, фьорда), объемом стока пресных вод, составом пород питающей провинции (минеральный и химический), расстоянием до фронта ледника и колебанием уровня моря (Benn, Evans, 2014).

Таблица 2. Изотопный состав Pb отложений залива Ога

Образец	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$
18–20	38.5919	0.0015	15.6349	0.0006	19.1357	0.0008
100–102	38.5989	0.0015	15.6335	0.0006	19.1340	0.0008
120–122	38.5939	0.0015	15.6347	0.0006	19.1317	0.0008
160–162	38.5924	0.0015	15.6350	0.0006	19.1344	0.0008
200–202	38.5878	0.0015	15.6358	0.0006	19.1398	0.0008
300–302	38.5842	0.0015	15.6333	0.0006	19.1228	0.0008
340–342	38.6055	0.0015	15.6321	0.0006	19.1075	0.0008
400–402	38.5681	0.0015	15.6344	0.0006	19.1183	0.0008

*SE – стандартная ошибка среднего значения единичного измерения.

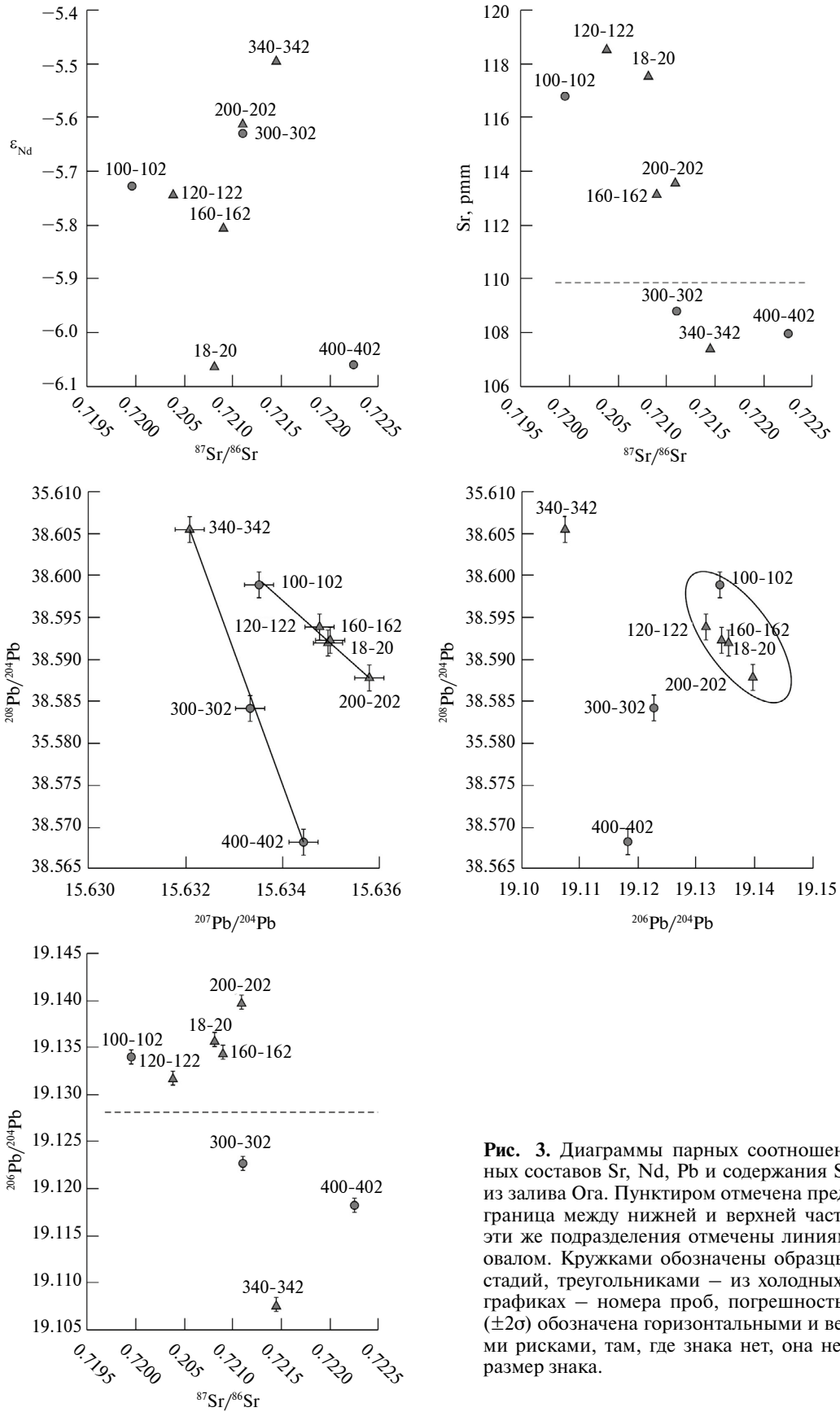


Рис. 3. Диаграммы парных соотношений изотопных составов Sr, Nd, Pb и содержания Sr для пород из залива Ога. Пунктиром отмечена предполагаемая граница между нижней и верхней частью разреза, эти же подразделения отмечены линиями тренда и овалом. Кружками обозначены образцы из теплых стадий, треугольниками – из холодных, цифры на графиках – номера проб, погрешность измерения ($\pm 2\sigma$) обозначена горизонтальными и вертикальными рисками, там, где знака нет, она не превышает размер знака.

Процессы, преобладающие во время теплых и холодных этапов, позволяют различать их на литологическом (укрупнение зерен осадка, увеличение доли материала ледового разноса в теплые периоды и уменьшение размера частиц осадка в холодные периоды) и биологическом уровнях (увеличение разнообразия видов животных в теплые периоды и их сокращение в холодные). Однако вариации в гранулометрическом составе и доля частиц ледового разноса не отражаются на изотопном составе осадка из заливов Ога и Цивольки.

Изучение изотопного состава Sr, Nd, Pb глинистых отложений морей Арктики обычно проводится для колонок осадков, накопившихся за время от 20 тысяч лет и больше. В таких работах авторам с помощью изотопного анализа удается подметить смену в режиме питания бассейна седиментации обычно за счет смены наклона кривой изотопного состава Sr, а также Nd и Pb. Изменение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ часто связывают с изменением содержания глинистых минералов (иллита), что может быть вызвано изменением режима деградации ледника (Sward et al., 2022). Мы рассчитали скорость изменения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для последних 10 тыс. лет в колонке из трога Маккензи (море Бофорта, Канада, Sward et al., 2022). Изотопный состав стронция здесь уменьшается в среднем на 0.00049 в тысячу лет. Изменение изотопного отношения Sr в осадках пролива Фрама (Баренцево море), то есть в более глубоководной обстановке, происходит со скоростью 0.00078 за тысячу лет (Tütken et al., 2002). Для отложений из залива Ога это происходит значительно быстрее: 0.00143 за тысячу лет, что сопоставимо с данными для залива Цивольки – 0.00124 за тысячу лет. Свард с коллегами (Sward et al., 2022) объясняют увеличение скорости изменения изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, кроме всего прочего, сменой преобладающего режима выветривания, что приводит к уменьшению фракции осадочного материала, например от песчаной до глинистой, и увеличению в нем доли иллита. Повышение содержания ^{87}Sr в глинах (например, иллите) является обычным явлением, поскольку высокая концентрация Rb в них приводит к накоплению ^{87}Sr в результате радиоактивного распада. В отложениях залива Ога такой смены в составе тонкой фракции не отмечено, на тройной диаграмме иллит-хлорит-каолинит (рис. 6) все точки состава ложатся рядом. Таким образом, не получается объяснить

Таблица 3. Содержание Rb, Sr, Sm, Nd и изотопный состав Sr и Nd отложений залива Цивольки

Образец	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\text{SD}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\text{SE}^*$	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\text{SD}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\text{SE}^*$	ϵ_{Nd}	T_{Nd}
4–6	128	134	2.7678	0.0043	0.720487	0.000009	4.684	22.897	0.12368	0.00001	0.512279	0.000004	-7.0	1.41
8–10	125	138	2.6346	0.0006	0.720151	0.000009	4.816	23.447	0.12419	0.00001	0.512273	0.000009	-7.1	1.43
20–25	131	120	3.1567	0.0014	0.721984	0.000012	4.717	22.799	0.12507	0.00005	0.512308	0.000009	-6.4	1.39
50–52	137	99	4.0043	0.0015	0.725898	0.000008	4.817	23.589	0.12346	0.00001	0.512298	0.000006	-6.6	1.38
90–92	144	117	3.5695	0.0069	0.724382	0.000005	5.033	24.932	0.12204	0.00000	0.512245	0.000002	-7.7	1.45
150–152	137	113	3.5114	0.0017	0.724889	0.000008	5.258	25.905	0.12272	0.00001	0.512213	0.000009	-8.3	1.51
190–192	134	105	3.6885	0.0009	0.725803	0.000011	5.339	26.100	0.12367	0.00001	0.512219	0.000010	-8.2	1.52
230–232	125	109	3.3209	0.0020	0.723790	0.000013	5.507	26.966	0.12346	0.00001	0.512223	0.000015	-8.1	1.51
290–292	123	114	3.1171	0.0066	0.722892	0.000011	5.425	26.643	0.12310	0.00000	0.512216	0.000009	-8.2	1.51
370–372	115	123	2.7039	0.0006	0.720548	0.000011	5.567	27.693	0.12153	0.00001	0.512207	0.000010	-8.4	1.50
450–452	112	111	2.9403	0.0011	0.720800	0.000008	5.636	27.812	0.12252	0.00001	0.512230	0.000008	-8.0	1.48

*SE - стандартная ошибка среднего значения единичного измерения.

уменьшение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ только изменением режима деградации ледника.

Кроме того, изменение изотопного состава Sr можно было бы объяснить прямым поступлением в осадки морского стронция с низким изотопным составом как в результате отложения собственно карбонатного вещества, так и в результате накопления органического вещества, что привело бы к изменению количества карбонатного вещества. Безусловно, такое влияние проявилось бы в замет-

ном повышении концентрации стронция там, где карбонатной фазы больше. Однако предыдущие исследования (Rusakov et al., 2022a, b) показали, что в осадках залива Ога и Цивольки карбонатная фаза (кальцит и доломит) составляет порядка 2 мас. %. Того Sr, который накапливается в этом веществе, недостаточно для существенного изотопного сдвига.

Расчет Sm-Nd одностадийного модельного возраста (T_{Nd1}) для всех образцов из залива Ога пока-

Таблица 4. Изотопный состав Pb отложений залива Цивольки

Образец	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\text{SE}^*$
4–6	19.238	0.002	15.660	0.002	38.643	0.006
8–10	19.329	0.002	15.668	0.002	38.713	0.006
20–25	19.226	0.002	15.655	0.002	38.631	0.004
50–52	19.316	0.004	15.662	0.004	38.667	0.010
90–92	19.340	0.001	15.671	0.001	38.775	0.004
150–152	18.093	0.002	15.669	0.002	36.438	0.004
190–192	18.053	0.002	15.663	0.002	36.463	0.004
230–232	18.039	0.002	15.661	0.002	36.461	0.006
290–292	18.003	0.002	15.659	0.002	36.488	0.006
370–372	17.979	0.002	15.648	0.002	36.495	0.006
450–452	17.878	0.006	15.635	0.006	36.526	0.014

*SE - стандартная ошибка среднего значения единичного измерения.

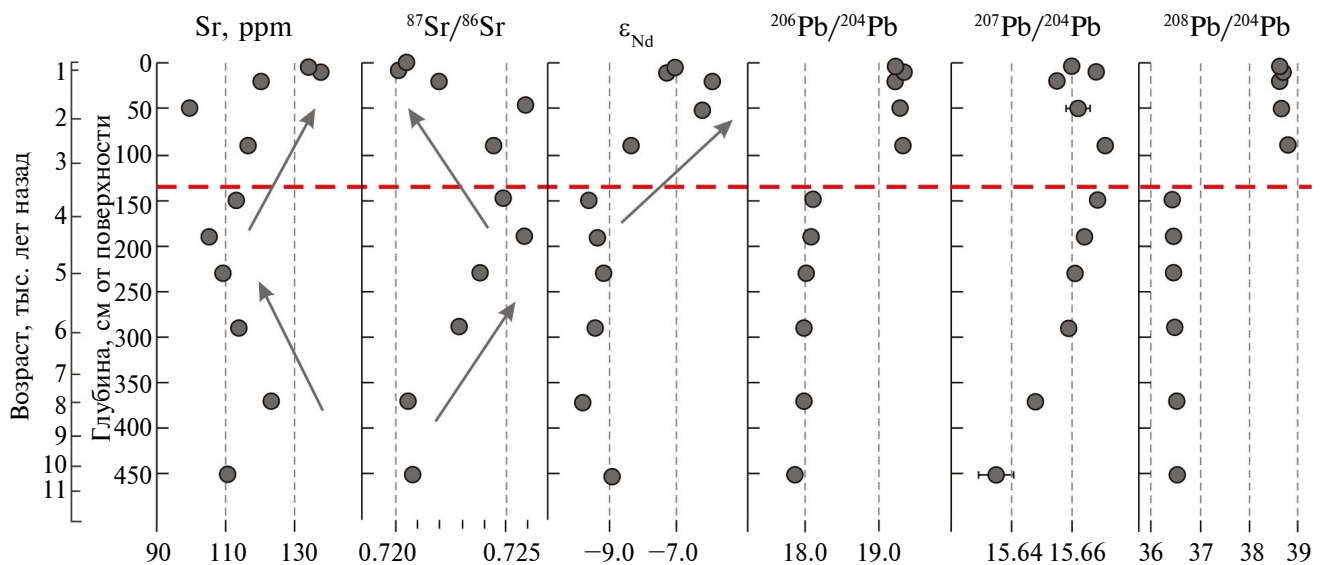


Рис. 4. Распределение содержания Sr и изотопных составов Sr, Nd, Pb по колонке АК-5251 (залив Цивольки). Стрелками показаны тренды изменения составов, пунктирной линией – граница смены источника сноса. Погрешность измерения ($\pm 2\sigma$) обозначена горизонтальными рисками в тех случаях, когда она превышает размер знака.

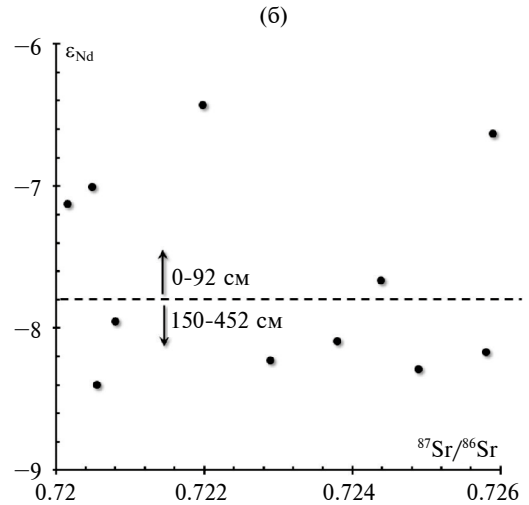
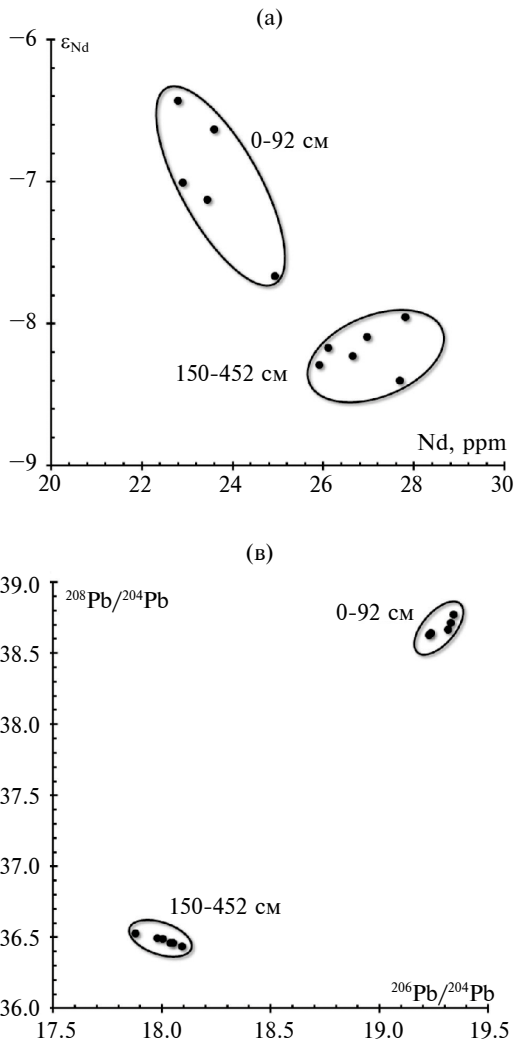


Рис. 5. Положение образцов из залива Цивольки в координатах (а) содержание Nd— ϵ_{Nd} , (б) $^{87}Sr/^{86}Sr$ — ϵ_{Nd} (пунктирной линией разделены горизонты, расположенные выше и ниже границы предложенных в тексте подразделений), и (в) $^{206}Pb/^{204}Pb$ — $^{208}Pb/^{204}Pb$. На графиках видно, что осадки верхней и нижней части разреза занимают различные поля. Это отчетливо указывает на смену пород в источнике сноса.

зал близкие значения — 1.31 ± 0.02 млрд лет. Если принять Sm-Nd одностадийный возраст за время отделения вещества источника от мантии, то можно оценить величину Rb/Sr отношения в нем. Для расчета линии эволюции использовались две точки (рис. 7а). Одна — современный изотопный состав Sr изученных глин (среднее значение 0.7210 ± 7), другая — состав мантии 1.31 млрд лет назад (0.7017). В результате расчетное отношение Rb/Sr составило 0.36. Такое значение типично для коровых пород. По палеогеографическим реконструкциям (Басов и др., 2009; Кораго и др., 2022) Уральский ороген поставлял большую часть обломочного материала в палеозойский осадочный бассейн, где формировались глубоководные, а затем мелководные карбонатно-терригенные комплексы.

Вероятно, быстрое уменьшение отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ при относительно стабильных значениях изотопных отношений неодима и свинца указывает на изменение в породах питающей провинции,

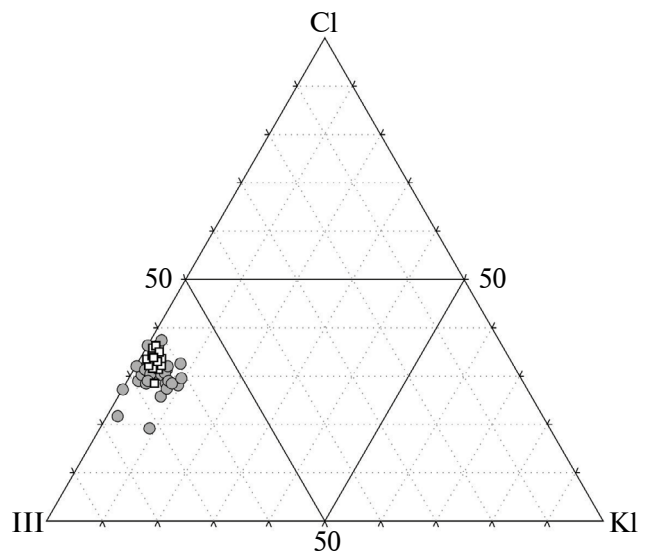


Рис. 6. Минеральный состав отложений из кернов залива Ога (квадраты) и Цивольки (кружочки), данные взяты из (Rusakov et al., 2022a, b), III — иллит, Cl — хлорит, KI — каолинит.

а именно в ложе ледника, где скорость абразии самая высокая (Benn, Evans, 2014). Основываясь на геологических данных (Кораго и др., 2022), такую смену можно объяснить сначала поступлением в нижнюю часть колонки кластогенного материала, образовавшегося в результате разрушения пермских глинистых сланцев, а затем материала девон-силурийских карбонатных пород. Считается, что на протяжении с силура по пермь на территории современного востока Новой Земли существовал единый осадочный бассейн с общей питающей провинцией (Басов и др., 2009, Кораго и др., 2022). Это позволяет объяснить высокую однородность величины ϵ_{Nd} в отложениях колонки, поскольку изотопный состав Nd в осадках наследуется таковой породой, слагающих область сноса материала (Taylor, McLennan, 1985). В свою очередь, хемогенно-карбонатные породы фиксируют изотопный состав Sr бассейна седиментации, в котором происходило их отложение (McArthur et al., 2020). Это приводит к различиям в изотопном составе Sr между обломочными и хемогенными отложениями одного и того же осадочного бассейна.

Подобный процесс, вероятно, фиксируется в нижней части керна из залива Цивольки. Для нижней части характерны постоянные изотопный состав Nd и Pb и рост отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ снизу вверх по разрезу, изменений в относительном содержании иллита и хлорита в этом разрезе не отмечено (рис. 4, 6). Здесь, как мы считаем, источник сноса был один и/или разрушались породы, накопившиеся в одном и том же осадочном бассейне, например, карбонатные породы с более низким отношением $^{87}Sr/^{86}Sr$ постепенно сменились на терригенные с высоким отношением $^{87}Sr/^{86}Sr$. Одностадийный модельный возраст (T_{Nd1}) этих отложений 1.52–1.48 млрд лет (рис. 7б).

Как было сказано выше, по изменению направления тренда вариаций отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ и распределению изотопных составов Nd и Pb колонку осадков можно разделить на верхнюю (0–150 см) и нижнюю (150–452 см) части. Выше предлагаемой границы происходит существенное изменение в изотопном составе Nd и Pb, отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ понижается, модельный возраст незначительно, но уменьшается до 1.45–1.38 млрд лет (рис. 7б). Такие изменения, вероятнее всего, отражают смену как изотопного состава Sr состава, так и, вероятно, химического, пород питающей провинции в ложе ледника, отличных по составу от предыдущих. Такой источник описан в статье Лоренца с соавторами (Lorenz et al., 2013). Изучив распределение значений возраста детритовых цирконов, они установили, что в отложениях на севере – северо-востоке Новой Земли на рубеже ордовик–силур произошло значительное изменение источников сноса обломочного материала. В кембрий–ордовикское время преимущественно размывались поздние тиманиды, в конце ордовика–силуре в Новоземельский бассейн материал поставляли гренвильские и более древние комплексы; а роль тиманид была незначительна. В досилурийское время, кроме того, размыву подверглись раннекаледонские (?) гранитоиды, при этом положение источников сноса обломочного материала для этих районов неясно (Lorenz et al., 2013). Поскольку в ходе ледовой эрозии и транспортировки обломочного вещества происходит его гомогенизация, более детальной информации мы получить не можем.

Изотопные (Sr, Nd, Pb) характеристики обломочного материала являются реперами для определения не только источников вещества в прошлом, но и в настоящем. Обломочный материал в Карское море поступает со стоком рек Оби и Енисея,

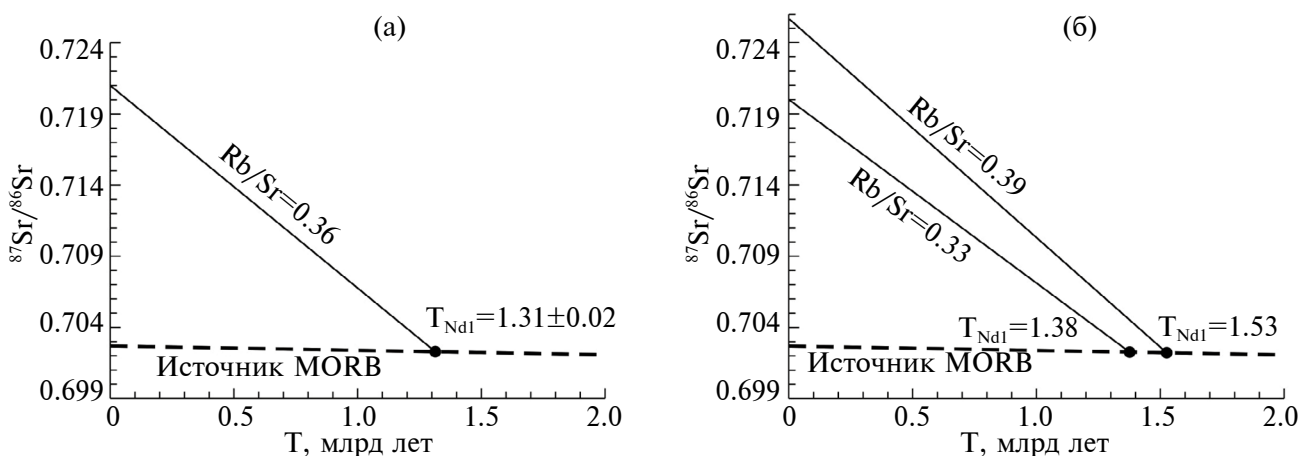


Рис. 7. Эволюция изотопного состава Sr во времени для предполагаемого источника (сплошная линия) осадочных пород (а) залива Ога и (б) залива Цивольки архипелага Новая Земля.

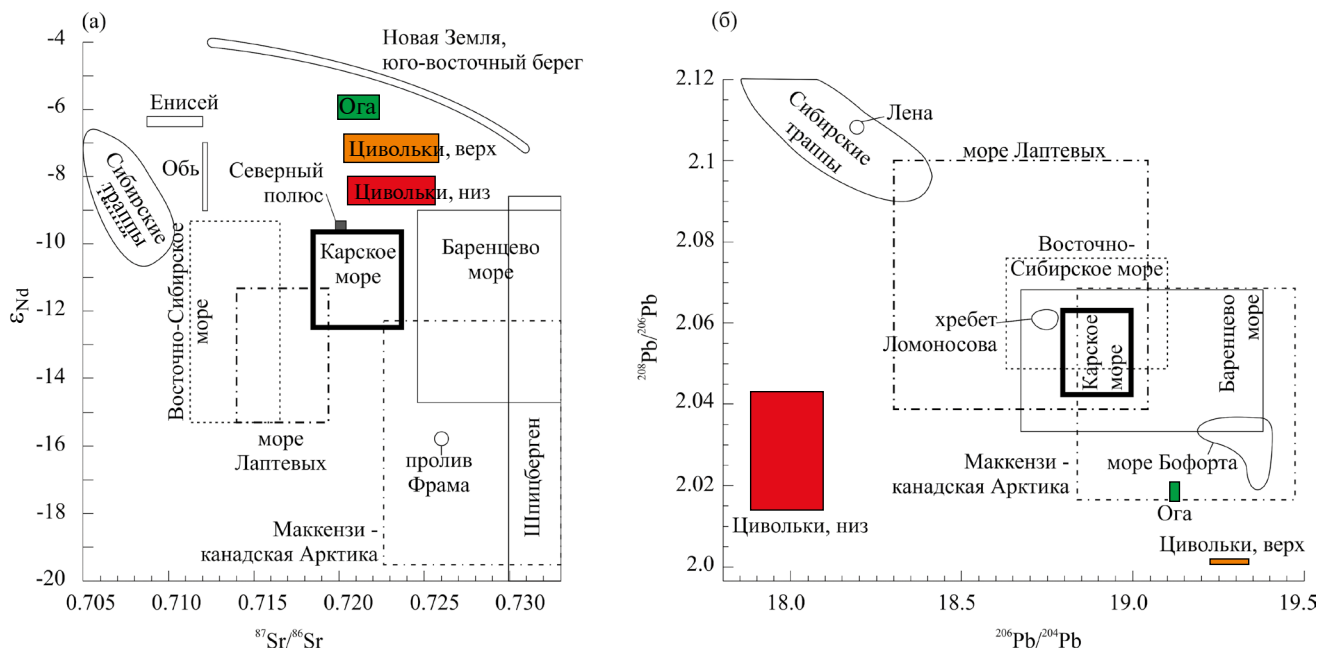


Рис. 8. Изотопный состав отложений заливов Ога и Цивольки в сравнении с вероятными источниками сноса в координатах (а) $\epsilon_{Nd} - {}^{87}Sr/{}^{86}Sr$ и (б) ${}^{208}Pb/{}^{206}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$. Данные для отложений разных провинций взяты из следующих работ: юго-восточный берег Новой Земли и Шпицберген (Tütken et al., 2002), реки Енисей и Обь (Guo et al., 2004; Schmitt, 2007), Северный полюс (Eisenhauer et al., 1999), Восточно-Сибирское море, Карское море, море Лаптевых, Баренцево море, пролив Фрама, река Маккензи и территория канадской Арктики (Maccali et al., 2018), река Лена (Millot et al., 2004), хребет Ломоносова (Stevenson et al., 2015), море Бофорта (Gartside, 1996); базальты Сибирской трапповой провинции (Lightfoot et al., 1992; Wooden et al., 1993).

приносится из Баренцева моря и моря Лаптевых, а также немалую роль играет эоловый разнос. Каждый из этих источников имеет свой изотопный состав Sr, Nd, Pb, который представлен в работах (Schmitt, 2007; Maccali et al., 2013). На основе этих данных можно сравнить изученные отложения заливов Ога и Цивольки с вероятными источниками сноса и проверить гипотезу о возможном привносе вещества. На диаграмме $\epsilon_{Nd} - {}^{87}Sr/{}^{86}Sr$ (рис. 8) они занимают поле между отложениями юго-восточного берега Новой Земли (Tütken et al., 2002) и осадками Карского моря в целом (Maccali et al., 2018). На диаграмме ${}^{208}Pb/{}^{206}Pb - {}^{206}Pb/{}^{204}Pb$ отложения из залива Цивольки занимают свое собственное место, не приуроченное ни к какому источнику, а осадки залива Ога попадают на нижнюю границу поля река Маккензи (Канада, Maccali et al., 2018). Авторы последнего исследования также замечают схожесть Pb-изотопных характеристик бассейна р. Маккензи и района Баренцева-Карского моря. Они это связывают с активным перемешиванием осадка внутренними морскими течениями и переносом его морским льдом. Однако более вероятно то, что в бассейне р. Маккензи выходят породы, схожие по Pb-изотопным характеристикам и возрасту (Harrison et al., 2011). Распределение Sr-, Nd-, Pb-изотопных данных еще раз указывает на то, что

в заливах Ога и Цивольки накапливаются отложения, полученные при разрушении пород преимущественно северо-восточного берега Северного острова Новой Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение изотопных характеристик осадочных последовательностей, накопленных за небольшой промежуток времени во фьордах Новой Земли, позволило достоверно установить следующие факты из истории ледников Голубой и Серп и молот.

Разница между превалирующими климатическими процессами никак не отражается на изотопном (Sr, Nd, Pb) составе осадка. Отложения, накопившиеся в заливе Ога и в верхней части керна из залива Цивольки схожи по изотопному составу Sr, Nd и Pb. Изменение состава пород питающих провинций, находящихся в ложе ледника, прослеживается с большой точностью, несмотря на хорошую гомогенизацию осадка. Причем можно уловить смену пород, как в пределах одного бассейна, так и изменение самих питающих провинций. Мы установили, что в источнике для отложений залива Ога обломочные породы сменились на карбонатные, в отложениях нижней части разреза из

залива Цивольки, вероятнее всего, зафиксирован обратный процесс: смена карбонатных пород на терригенные. Определили, что в отложениях залива Цивольки отражается изменение в питающих провинциях, которое произошло на границе ордовика и силура на территории новоземельского бассейна, отмеченное ранее в работе (Lorenz et al., 2013). Сопоставление по изотопными данным с вероятными современными питающими провинциями показало, что поля распределения изученных пород занимают свое собственное место. Заметного привноса вещества из других провинций, кроме Новой Земли, не было.

Авторы выражают глубокую благодарность В.Ю. Русакову за предоставленный материал, А.В. Чузаеву, А.В. Сомсиковой, Т.И. Олейниковой и Т.И. Кирнозовой за помощь в проведении изотопных исследований. Авторы искренне признательны за огромную работу над текстом статьи, которую провели научный редактор Б.Г. Покровский и, в особенности, рецензенты. Их комментарии и исправления сделали, как мы надеемся, нашу работу намного понятнее и качественнее.

Работа выполнена в рамках НИР ГЕОХИ РАН и ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басов В.А., Василенко Л.В., Вискунова К.Г., Кораго Е.А., Корчинская М.В., Куприянова Н.В., Пovyшшева Л.Г., Преображенская Э.Н., Пчелина Т.М., Столбов Н.М., Суворова Е.Б., Супруненко О.И., Сулова В.В., Устинов Н.В., Устрицкий В.И. & Фефилова Л.А. (2009). Эволюция обстановок осадконакопления Баренцево-Северо-Карского палеобассейна в фанерозое. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. **4** (1), 1–3.
- Горшков С.Г., Алексеев В.Н., Фалеев В.И. (1980). Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Наука, 200 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации, лист S-38-40, масштаб 1:1000000 (1999) Отв. редактор Лопатин Б.Г., Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Фяйзулина Р.В. (2017) Изотопные (δD , $\delta^{18}O$) параметры и источники опресненных вод Карского моря. *Океанология*. **57**(1), 38–48. DOI: 10.7868/S003015741701004X
- Кораго Е.А., Ковалева Г.Н., Шеколкин Р.А., Ильин В.Ф., Гусев Е.А., Крылов А.А.1, Горбунов Д.А. (2022) Геологическое строение архипелага Новая Земля (Запад Российской Арктики) и особенности тектоники Евразийской Арктики. *Геотектоника*. **2**, 21–57. DOI 10.31857/S0016853X22020035
- Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Политова Н.В., Шевченко В.П., Козина Н.В., Новигатский А.Н., Кравчишина М.Д., Алексеева Т.Н. (2020) Распределение редких и рассеянных элементов и изотопный состав Nd, Pb и Sr в поверхностных осадках Баренцева моря. *Геохимия*. **65**(6), 566–582.
- Maslov A.V., Kuznetsov A.B., Politova N.V., Shevchenko V.P., Kozina N.V., Novigatsky A.N., Kravchishina M.D., Alexeeva T.N. (2020) Distribution of trace and rare-earth elements, and Nd, Pb, and Sr isotopes in the surface sediments of the Barents Sea. *Geochem. Int.* **58**(6), 687–703.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Кузнецов А.Б., Штайн Р. (2018) Геохимическая и Sr-Nd-Pb-изотопная характеристика осадочного материала, переносимого дрейфующими льдами Северного Ледовитого океана. *Геохимия*. **8**, 729–744.
- Maslov A.V., Shevchenko V.P., Kuznetsov A.B., Stein R. (2018) Geochemical and Sr–Nd–Pb-isotope characteristics of ice-rafted sediments of the Arctic Ocean. *Geochem. Int.* **58**(8), 751–765.
- Benn D.I., Evans D.J.A. *Glaciers & glaciation*. Routledge, 2014.
- Dutton A., Carlson A.E., Long A.J., Milne G.A., Clark P.U., DeConto R., ... Raymo M.E. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*. **349**(6244), aaa4019–aaa4019. doi:10.1126/science.aaa4019.
- Dyer B., Austermann J., D’Andrea W.J., Creel R.C., Sandstrom M.R., Cashman M., Rovere A., Raymo M.E. (2021) Sea level trends across the Bahamas constrain peak last interglacial ice melt. *PNAS*. **118**, e2026839118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2026839118>.
- Eisenhauer A., Meyer H., Rachold V., Tütken T., Wiegand B., Hansen B.T., Spielhagen R.F., Lindemann F., Kassens H. (1999) Grain size separation and sediment mixing in Arctic Ocean sediments: evidence from the strontium isotope systematic. *Chemical Geology*. **158**, 173–188. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00026-1)
- Fagel N., Innocent C., Garipey C., Hillaire-Marcel C. (2002) Sources of Labrador Sea sediments since the last glacial maximum inferred from Nd-Pb isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **66**(14), 2569–2581. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00866-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00866-9)
- Gartside M. (1996) Sources et inventaire du plomb anthropique dans les sediments de l’Océan Arctique profond. Département des Sciences de la Terre. Université du Québec à Montréal, Montréal, p. 79.
- Goswami V., Singh S.K., Bhushan R., Rai V.K. (2012), Temporal variations in $^{87}Sr/^{86}Sr$ and ϵ_{Nd} in sediments of the southeastern Arabian Sea: Impact of monsoon and surface water circulation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **13**, Q01001, doi:10.1029/2011GC003802
- Guo L., Semiletov I., Gustafsson Ö., Ingri J., Andersson P., Dudarev O., White D. (2004) Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial organic carbon export. *Global Biogeochemical Cycles*. **18**(1). <https://doi.org/10.1029/2003GB002087>
- Harrison J.C., St-Onge M.R., Petrov O.V., Strelnikov S.I., Lopatin B.G., Wilson F.H., Tella S., Paul D., Lynds T., Shokalsky S.P., Hulst C.K., Bergman S., Jepsen H.F., Solli A. (2011) Geological Survey of Canada, “A” Series Map 2159A, 9 sheets; 1 DVD, <https://doi.org/10.4095/287868>

- IBCAO https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean/ (доступ от 31.03.2023)
- Innocent C., Fagel N., Hillaire-Marcel C. (2000) Sm-Nd isotope systematics in deep-sea sediments: Clay-size versus coarser fractions. *Mar. Geol.* **168**, 79–87. doi:10.1016/S0025-3227(00)00052-9
- Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. (1993) Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.* **114**, 171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>
- Lorenz H., Gee D. G., Korago E., Kovaleva G., McClelland W.C., Gilotti J.A., Frei D. (2013) Detrital zircon geochronology of Palaeozoic Novaya Zemlya - a key to understanding the basement of the Barents Shelf. *Terra Nova*. **25**(6), 496–503. doi:10.1111/ter.12064
- Maccali J., Hillaire-Marcel C., Carignan J., Reisberg L.C. (2013) Geochemical signatures of sediments documenting Arctic sea-ice and water mass export through Fram Strait since the Last Glacial Maximum. *Quat. Sci. Rev.* **64**, 136–15. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.029>
- Maccali J., Hillaire-Marcel C., Not C. (2018) Radiogenic isotope (Nd, Pb, Sr) signatures of surface and sea ice-transported sediments from the Arctic Ocean under the present interglacial conditions. *Polar Res.* **37**, 1, DOI: 10.1080/17518369.2018.1442982
- McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A., Zhou Y. (2020) Chapter 7 - Strontium Isotope Stratigraphy, Editor(s): Felix M. Gradstein, James G. Ogg, Mark D. Schmitz, Gabi M. Ogg / *Geologic Time Scale*. Elsevier, 211–238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00007-3>
- Meyer I., Davies G.R., Stuut J.-B.W. (2011) Grain size control on Sr-Nd isotope provenance studies and impact on paleoclimate reconstructions: An example from deep-sea sediments offshore NW Africa. *Geochim. Geophys. Geosyst.* **12**, Q03005. doi:10.1029/2010GC003355
- Millot R., Allègre C.J., Gaillardet J., Roy S. (2004) Lead isotopic systematics of major river sediments: a new estimate of the Pb isotopic composition of the Upper Continental Crust. *Chem. Geol.* **203**, 75–90. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.09.002>
- Rusakov V., Kuz'mina T., Borisov A., Gromyak I., Dogadkin D., Romashova T., Solovi'eva G., Lukmanov R. (2022a) A drastic change in glacial dynamics at the beginning of the seventeenth century on Novaya Zemlya coincides in time with the strongest volcanic eruption in Peru and the Great Famine in Russia. *Quat. Res.*, 1–14. <https://doi.org/10.1017/qua.2021.74>
- Rusakov V.Y., Kuz'mina T.G., Krupskaya V.V., Gromyak I.N., Dogadkin D.N., Romashova T.V. (2022b) Holocene history of the eastern side of Novaya Zemlya from glaciomarine sediment records in the Tsvol'ki Fjord. *Boreas*. **51**, 859–876. <https://doi.org/10.1111/bor.12585>
- Rutberg R.L., Goldstein S.L., Hemming S.R., Anderson R.F. (2005) Sr isotope evidence for sources of terrigenous sediment in the southeast Atlantic Ocean: Is there increased available Fe for enhanced glacial productivity? *Paleoceanography*. **20**, PA1018. doi:10.1029/2003PA000999
- Schmitt W. (2007) Application of the Sm-Nd isotope system to the late Quaternary paleoceanography of the Yermak Plateau (Arctic Ocean) (Doctoral dissertation, Imu).
- Stevenson R., Poirier A., Véron A., Carignan J., Hillaire-Marcel C. (2015) Late Eocene to present isotopic (Sr–Nd–Pb) and geochemical evolution of sediments from the Lomonosov Ridge, Arctic Ocean: Implications for continental sources and linkage with the North Atlantic Ocean. *C. R. Geosci.* **347**(5–6), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.02.008>
- Swärd H., Andersson P., Hilton R., Vogt C., O'Regan M. (2022) Mineral and isotopic (Nd, Sr) signature of fine-grained deglacial and Holocene sediments from the Mackenzie Trough, Arctic Canada. *Arct. Alp. Res.* **54**(1), 346–367. DOI: 10.1080/15230430.2022.2096425
- Taldenkova E. (2023) “Holocene history of the eastern side of Novaya Zemlya from glaciomarine sediment records in the Tsvol'ki Fjord”: Comments. *Boreas*. **52**, 139–144. <https://doi.org/10.1111/bor.12603>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwells Scientific, Oxford. 312 p.
- Tütken T., Eisenhauer A., Wiegand B., Hansen B.T. (2002) Glacial-interglacial cycles in Sr and Nd isotopic composition of Arctic marine sediments triggered by the Svalbard/Barents Sea ice sheet. *Mar. Geol.* **182**, 351–372.
- Walter H.J., Hegner E., Diekmann B., Kuhn G., Rutgers van der Loeff M.M. (2002) Provenance and transport of terrigenous sediment in the south Atlantic Ocean and their relations to glacial and interglacial cycles: Nd and Sr isotopic evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **64**(22), 3813–3827. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00476-2)
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Arndt N.T., Chauvel C., Bouse R.M., King B.S.W., Knight R.J., Siems D.F. (1993) Isotopic and trace element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **57**, 3677–3704. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90149-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90149-Q)

PROVENANCE CHANGES OF THE HOLOCENE DEPOSITS OF OGA AND TSIVOLKI BAYS (NOVAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO) ACCORDING TO SR, ND, PB ISOTOPE DATA

I. A. Vishnevskaya^{a,*}, Y. A. Kostitsyn^a, T. G. Okuneva^b, N. G. Soloshenko^b

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) RAS,
Kosygina str., 19, Moscow, 119991 Russia

^b Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Akademika Vonsovskogo str., 15,
Ekaterinburg, 620016 Russia

*vishnevskaya@geokhi.ru

The paper is devoted to the Sr-, Nd-, Pb-isotope data obtained for two cores of bottom sediments taken in the Oga and Tsvolki bays of the Severny Island of the Novaya Zemlya archipelago. The studied sequence of sediments from Oga Bay has been accumulated over the last thousand years. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio decreases from top to bottom down the section from 0.72225 to 0.71995, the value of ϵ_{Nd} varies from -6.1 to -5.5 . The Pb isotopic composition varies within narrow limits: the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio from 19.107 to 19.139, the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio from 15.632 to 15.635, and the $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio from 38.568 to 38.635. A rapid decrease in the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio at a relatively stable neodymium and lead isotope composition indicates a change in the source of the clastogenic material. This can be explained by the fact that the material of the destruction of Permian clay shales, and then the Devonian-Silurian sedimentary carbonates, first entered the area of glacier abrasion and further, respectively, into the sedimentation zone.

The sediment column from the Tsvolki Bay was formed over a little more than 10 thousand years. Based on the Sr, Nd, and Pb isotope ratios, these bottom sediments are divided into lower and upper parts: before and after 150 cm (or ~ 3500 years). In the lower part of the column, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio increases from 0.72055 to 0.72580, the value of ϵ_{Nd} remains approximately the same and varies around -8.2 . In the upper part, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio drops to 0.72049 in the near-surface layer; at the same time, the value of ϵ_{Nd} increases to -6.4 . At the boundary of these two units, the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio abruptly changes from about 18.0 in the lower part to 19.3 in the upper part and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ from about 36.5 in the lower part to 38.7 in the upper part of the section. The change in the Sr, Nd, and Pb isotope characteristics is likely a reflection of changes in the composition of the rocks in the area where the basin was removed, which is now being eroded by the glacier.

Comparison with modern sources supplying clastic material to the Kara Sea showed that the material inputs the Oga and Tsvolki bays only from Novaya Zemlya.

Keywords: Strontium, neodymium, lead, glacier, provenance, reconstruction