

## Геохимия природных вод и льдов Земли Норденшельда (о. Зап. Шпицберген)

С.М. Архипов<sup>1</sup>, Х.-В. Хубберген<sup>2</sup>, Б.Г. Ванштейн<sup>3</sup>, Х. Мейер<sup>2</sup>, М.Д. Анапичева<sup>1</sup>, Л.М. Саватиюги<sup>4</sup>,  
С.М. Пряников<sup>4</sup>, Р.А. Чернов<sup>1</sup>, Д.А. Стрелецкий<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва; <sup>2</sup>Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Potsdam.

<sup>3</sup>ВНИИ Океангеология, Санкт-Петербург; <sup>4</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург; <sup>5</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Сравнительный анализ основных геохимических характеристик природных вод и льдов различного генезиса: ледниковых, озерных (конжеляционных), снежниковых, наледных, жильных, погребенных (предположительно ледникового происхождения).

### Введение

Генезис погребенных пластовых льдов до конца еще не определен. Один из возможных путей решения этой задачи — определение закономерных различий в параметрах современных наземных и подземных льдов разного, но известного генезиса, что и служит основной целью настоящей работы. Крайне полезной представляется и разработка общей модели преобразования изотопно-химического состава отложенных твердых атмосферных осадков по мере их преобразования в относительно монолитный лед и при формировании жидкого стока.

Химический, изотопно-кислородный и изотопно-водородный состав природных вод и льдов Шпицбергена исследован относительно хорошо, однако основное внимание уделялось изучению глубинных ледниковых кернов, полученных в центральных частях наиболее крупных ледников в палеогеографических целях (см. например, обзор [9]). Остается открытым и вопрос о точности и, главное, сопоставимости результатов исследований в целом и особенно химических анализов, проводившихся разными группами исследователей по различным методикам.

### Объекты и методика исследований

Исследования 2002 г. на архипелаге Шпицберген (о. Западный Шпицберген, п-ов Земля Норденшельда) проводились 10 июля — 17 августа в районе поселка Баренцбург западнее и восточнее залива Грэнфьорд: на леднике Альдегонда (№ 14108) и в его перигляциальной области (77,96–77,99° с.ш., 14–14,20° в.д.) (рис. 1); по правому борту (включая ледник № 14107 [8], около 78° с.ш., 14° в.д.) долины Стенброхультдален; на наледи в долине Линнея (южнее оз. Линнея, около 78° с.ш., 14° в.д.); на булгуньяхе в Грэндален (около 77° с.ш., 14,6° в.д.).

Методология наших работ определялась следующими обстоятельствами: выбором в качестве основного объекта исследований краевых зон небольших деградирующих ледников, так как именно относительно тонкие краевые участки отступающих ледников скорее всего и захоранивались в прошлом; отбором коллекций образцов всех семейств природных вод и льдов Земли Норденшельда (см. табл. 1 и рис. 1); соблюдением на всех этапах работ единообразия методик отбора, хранения, предварительной подготовки и анализа образцов.

Природные льды и воды Земли Норденшельда

Таблица 1

Тип	Класс	Семейство
IEE	Льды	
	IEA	ледники и снежники (снег, фирн и инфильтрационные льды)
	SFI	снег, фирн и молодой инфильтрационный лед
	IEG	ледниковый лед
	IEC	озерно-речные льды (конжеляционные)
	IEB	погребенные массивно-пластовые (неопределенного генезиса)
	IEN	наледные (смешанного генезиса)
	IEW	ледяные жилы
WIW	Водо-снежно-фирно-ледяная смесь ("болото", "каша")	
WEE	Воды	
	WEG	на/в леднике, наледи, снежнике
	WEB	по границе ледника, наледи, снежника
	WEP	в перигляциальной области
	WRP	реки и другие водотоки
	WLP	озера и другие водоемы

Всего было отобрано 177 образцов снега, фирна, льда, воды (объемом  $\geq 1$  л) из разных природных объектов: озер и небольших водоемов (включая лужи); рек, ручьев и других водотоков; однолетних и многолетних снежников; погребенных льдов предположительно снежниково-ледникового генезиса (точки 25, 50, 52 на рис. 1); конгляционных льдов (точка 43); снега, фирна и льда приповерхностных горизонтов ледников; фирна и льда из наледи; льда с

большим количеством минеральных включений из ледяной жилы в приповерхностных горизонтах булгуниаха в долине Грёндален.

При отборе образцов снега и фирна использовались пластиковые совки и керамический нож, которым зачищали и образцы льда (ледяного керна), отбиравшиеся с помощью шнекового механического ручного бура. Образцы растапливали в полиэтиленовых пакетах и, после тщательного взбалтывания, пе-

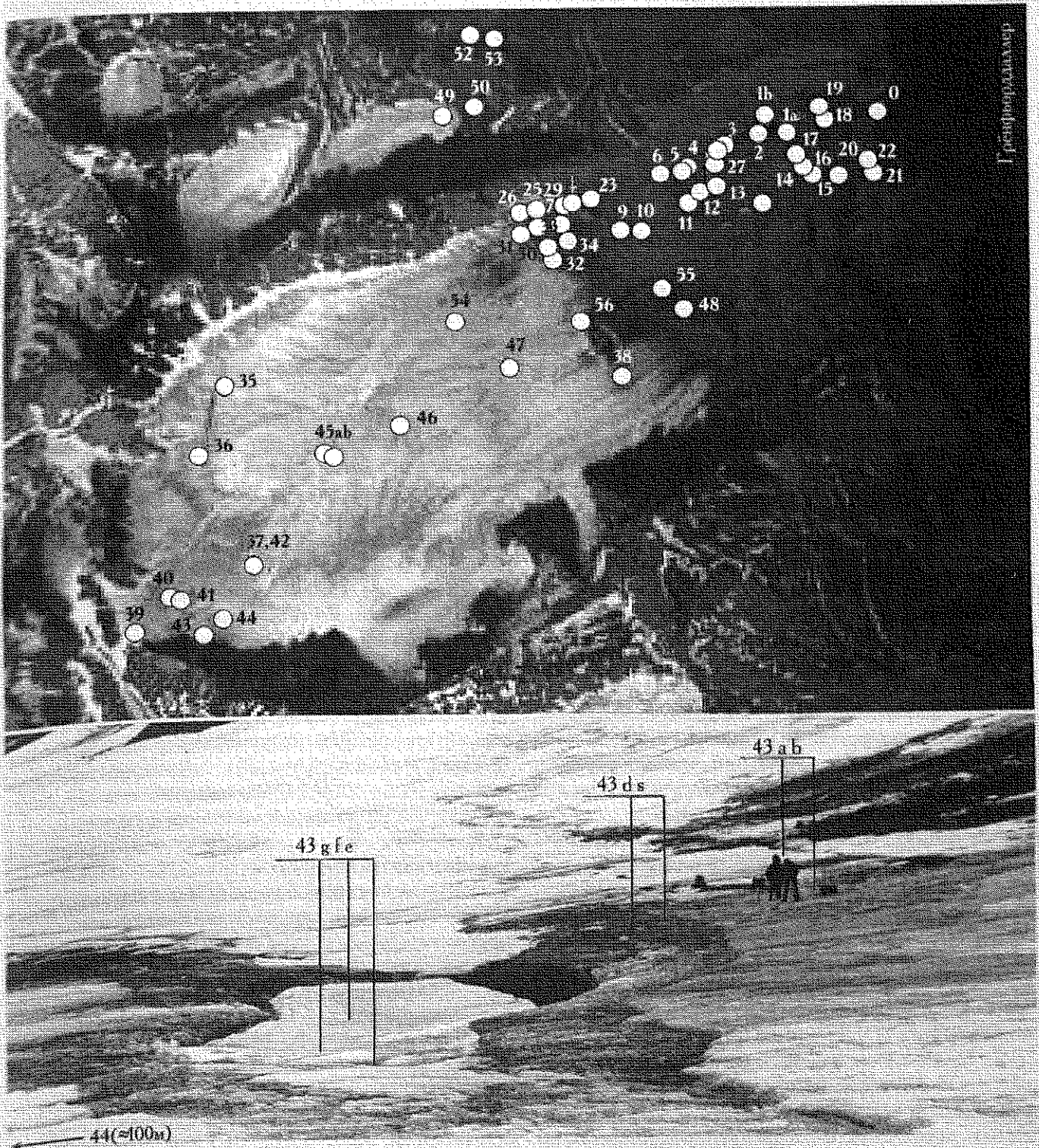


Рис. 1. Долина Альдегонда и ледник Альдегонда, правый борт долины Стенброхультдален и расположенные в ней ледники (точки 49–53).  
Fig. 1. Aldegonda valley and Aldegonda glacier, Stenbrohultdalen valley and glaciers located in it (sites 49–53)

реливали в герметичные фляги высокого давления из полиэтилена. Жидкие и полужидкие образцы отбирали непосредственно во фляги. Все полиэтиленовые пакеты и фляги прошли предварительную очистку в лабораторных условиях.

Измерения изотопно-кислородного  $\delta^{18}\text{O}$  и изотопно-водородного  $\delta\text{D}$  (V-SMOW) состава выполнены в Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Potsdam) Х. Мейером. Относительная погрешность измерений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , составила, соответственно, 0,1 и 0,8 ‰. Кислотность pH и концентрации отдельных ионов CN измерены в лаборатории ВНИИ Океангеология под руководством Б.Г. Ванштейна. Нижняя граница определения концентраций отдельных ионов DL составила для катионов < 0,01 мг/л, для анионов:  $\text{CO}_3^{2-}$  < 0,12 мг/л,  $\text{SO}_4^{2-}$  < 0,4 мг/л; для Cl<sup>-</sup> и  $\text{HCO}_3^-$  все полученные значения значимы. При статистических расчетах и построении графиков значениям CN < DL присваивались значения CN = DL/2.

Дополнительно были проанализированы характеристики, производные от CN (также рассчитанные при допущении CN < DL = DL/2; далее по тексту знак CN перед символами отдельных ионов опускается):

CE — общая минерализация, т.е. сумма CN всех основных анионов и катионов:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> (мг/л);

$\delta E^\pm$  — анион-катионный баланс,  $\delta E^\pm = (E^+ + E^-) / (|E^+| + |E^-|)$ , %, где E<sup>+</sup>, E<sup>-</sup> — сумма CN всех основных соответственно катионов и анионов с учётом знака, мг/л;

Na/Cl — «хлорный коэффициент», Na/Cl = Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>, где CN выражены в мг-экв./л;

nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — «non-sea-salt sulfate» («сульфаты не морского происхождения»),  $\text{nssSO}_4^{2-} = (\text{SO}_4^{2-} - 0,12(\text{Na}^+ - 0,5\text{K}^+)) / \text{SO}_4^{2-}$ , %, где CN выражены в мг-экв./л [6].

Анализ представительности полученных данных показал: концентрации  $\text{HCO}_3^-$ , Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> больше DL во всех образцах, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> — в подавляющем большинстве образцов. Для  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , K<sup>+</sup> во многих образцах CN < DL. Соответственно, крайне проблематичны и значения Na/Cl, nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в образцах, где CN( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) < DL (относительный вклад K<sup>+</sup> в расчёт nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ничтожно мал, и его значениями в этом случае можно пренебречь).

В сериях образцов протаявшего снежного покрова, фирна и ледникового льда критериям нормального распределения соответствуют, как правило, не сами значения CN,  $\delta^{18}\text{O}$ , а натуральные логарифмы этих величин lnCN или их модулей  $\ln|\delta^{18}\text{O}|$  [2–5]. Оценка параметров распределения pH, CN (включая концентрации H<sup>+</sup>, мг-экв./л),  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и т.д. в анализируемых сериях однотипных образцов (ледниковый лед, снежно-фирново-ледяные образцы из снежников, конжеляционные льды и т.п.) показала: критериям нормальности распределения соответствуют распределения значений  $\text{CO}_3^{2-}$ , Cl<sup>-</sup>,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и натуральных логарифмов значений Ca<sup>2+</sup>, Na/Cl, а также модулей  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ . Для остальных параметров от вы-

борки к выборке может наблюдаться несоответствие указанным критериям распределений как самих значений параметров или их натуральных логарифмов, так и тех, и других. Попытки исключения из выборок некоторых образцов (например, с большим количеством минеральных включений [1]) однозначного результата не дали. Поэтому все средние значения параметров X вычислены как для самих значений pH, CN,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  ( $X_n$ ), так и для  $\ln\text{pH}$ ,  $\ln\text{CN}$ ,  $\ln\delta^{18}\text{O}$ ,  $\ln|\delta\text{D}|$  ( $X_e$ ) с последующим обратным пересчетом ( $X_e$ ). Для серий образцов, отбирившихся в шурфах и скважинах, рассчитывались средние взвешенные значения с учетом интервала глубин отбора ( $X_{np}$ ,  $X_{eq}$ ); для образцов с поверхности объектов и из водоемов и водотоков различия в глубине отбора не принимались во внимание ( $X_{np}$ ,  $X_{eq}$ ). Средние значения CE,  $\delta E^\pm$ , Na/Cl, nssSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $E_n$ ,  $E_e$ ) вычислены для отдельных групп образцов на основе  $X_n$  и  $X_e$  отдельных ионов.

Многоступенчатая система классификации природных льдов (см. табл. 1) позволяет провести их сравнительный анализ с разной степенью детализации (на уровне типов, классов или семейств), а также изучить геохимию природных объектов (ледник, наледь, снежник и т.п.) в целом. На первом этапе работ основное внимание было уделено нивально-гляциальным комплексам как своего рода природным «моделям» формирования и взаимных переходов льдов различного генезиса.

Под нивально-гляциальными мы понимаем природные комплексы различного таксономического уровня, формирующиеся при активном круглогодичном воздействии снега и льдов разного генезиса.

#### Нивально-гляциальный комплекс «Бергшрунда»

Нивально-гляциальный комплекс «Бергшрунда» — подгорная трещина в верховьях ледника Альгетонда (см. рис. 1) — включает небольшие водотоки (глубиной до 15 мм, шириной до 100 мм) на поверхности ледника (WEE=>WEB=>WRP), многолетний снежник внутри трещины толщиной более 2,5 м и шириной до 3 м (IEE=>IEA=>SFI), собственно ледниковый лед (IEE=>IEA=>IEG), конжеляционные льды двух различных генераций, залегающие по периметру трещины в виде «полосы» шириной до 2 м и толщиной более 0,5 м (IEE=>IEC). Анализ полученных данных (рис. 2) показывает следующее.

1. Различия в геохимических характеристиках природных льдов, снежно-фирновых образований и вод даже в пределах небольшого по площади нивально-гляциального комплекса в целом весьма велики: концентрации отдельных ионов могут отличаться в 10–20 ( $\text{HCO}_3^-$ , Na<sup>+</sup>), 30–50 ( $\text{CO}_3^{2-}$ , Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) и даже более чем в 100 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) раз; значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  — на 6 и 34 ‰, соответственно. Аналогичная картина наблюдается и по отдельным классам и семействам, особенно для снежника и ледникового льда. Состав конжеляционных льдов и воды в водотоках значительно стабильнее. При этом в большом количестве образцов концентраций  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и K<sup>+</sup>

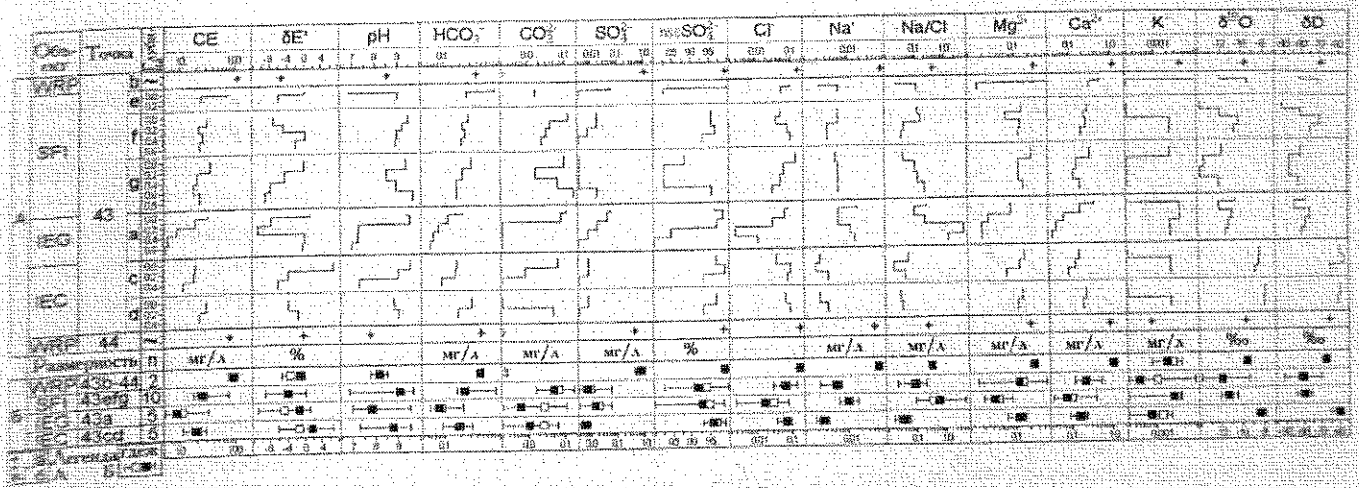


Рис. 2. Геохимические параметры нивально-гляциального комплекса «Бергшрудн» (точки 43–44 на рис. 1). А — значения параметра в отдельных образцах (а — значения параметра; б — CN<DL; в — значения параметра в образцах из водотоков); Б — минимальные (r), максимальные (д) и средние (е, ж) значения параметра ( $X_n$ ,  $E_n$  и  $X_e$ ,  $E_e$  соответственно); n — количество образцов

Fig. 2. Geochemical parameters of NGC «Bergshrund» (sites 43–44 at Fig. 1). A — values of parameters in separate samples (a — values of parameter; б — CN<DL; в — values of parameter in the samples from water streams); Б — minimum (r), maximum (d) and mean (e, ж) values of parameter ( $X_n$ ,  $E_n$  and  $X_e$ ,  $E_e$  accordingly); n — a number of samples

ниже DL. Соответственно относительно менее надежны данные по средним концентрациям этих ионов и производным от них параметрам (CE,  $\delta E^{\pm}$ ,  $nssSO_4^{2-}$ ).

В подобной ситуации для оценки значимости различий в геохимических параметрах различных классов и семейств природных льдов и вод необходимо специальный анализ параметров распределения каждой из соответствующих выборок (серий), желательно — объемом более 20–25 членов (образцов). Большинство выводов по комплексу «Бергшрудн» основано на анализе серий из 2–10 образцов и носит предварительный характер, хотя практически методика расчета средних значений большинства параметров, как правило, не влияет на конечные выводы (см. рис. 1). Исключение составляет  $\delta E^{\pm}$ .

2. Общая минерализация CE определяется в основном концентрациями  $HCO_3^-$  (как правило, 50–60% от CE). Исключение — водотоки (30%), где преобладает  $SO_4^{2-}$  (35–40%, обычно 2–8%). В целом водотоки отличаются резко повышенной, а ледниковый лед (особенно нижние горизонты) — резко пониженной общей минерализацией. Анион-катионный баланс  $\delta E^{\pm}$ , который определяется в основном концентрациями  $HCO_3^-$  (анионы) и  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  (катионы), относительно стабилен и обычно характеризуется небольшим превышением анионов над катионами (практически отсутствующим в конгломерационных льдах).

3. Значения pH существенно варьируют от горизонта к горизонту во всех снежно-фирново-ледяных образованиях, в целом синхронно с концентрациями  $CO_3^{2-}$  (в водотоках  $CO_3^{2-}$ , в отличие от других объектов, практически отсутствует).

4. Все сульфат-анионы (>92%, в водотоках 99%) — преимущественно «не морского» происхождения. Резкое обогащение  $SO_4^{2-}$  именно водотоков (в 50–100 раз в сравнении с другими объектами)

позволяет предположить наличие местного источника  $SO_4^{2-}$  «срабатывающего» преимущественно в летний период (см. ниже).

5.  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  явно образуют группу с CN, синхронно варьирующими как между собой, так и с CE в целом.

6. Соотношение Na/Cl свидетельствует о явно пониженном, в сравнении с морской водой, относительном содержании  $Na^+$  (для снежника и конгломерационных льдов — в 10–20 раз; marine ratio 0,86), что не типично ни для снежного покрова ледников Шпицбергена [3, 7], ни для фирна или инфильтрационного льда, так как в процессе фильтрации Cl<sup>-</sup> вымывается интенсивнее, чем  $Na^+$  [4]. Поскольку практически весь  $Na^+$  «морского» происхождения ( $nssNa^+ = Na^+ - 0,5K^+$ , [6]), остается предположить, как и для  $SO_4^{2-}$ , наличие для него местного источника Cl<sup>-</sup>. В принципе нельзя исключить и более интенсивный привнос Cl<sup>-</sup> как более летучего (в сравнении с  $Na^+$ ) элемента с близлежащих открытых (в летний период) морских поверхностей. Локальная изменчивость значений Na/Cl хорошо согласуется с вариациями именно концентраций Cl<sup>-</sup>, а не  $Na^+$  (см. рис. 2).

7. Значения  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  существенно «теплее» в водотоках и в конгломерационных льдах и «холоднее» в ледниковом льду и в снежнике, причем в последнем случае близки между собой; отклонения от общей закономерности —  $\delta D = 5,334\delta^{18}O - 17,17$  в целом невелики и наблюдаются в основном для снежника и конгломерационных льдов (рис. 3).

Линейная корреляция наиболее четко выражена для  $\delta^{18}O/\delta D$  ( $r^2=0,94$ ), а в снежниково-ледовых образованиях и для  $HCO_3^-/Ca^{2+}$  (и, вероятно,  $Mg^{2+}$ ). Для большинства других параметров результаты значительной части анализов носят либо полуколичественный (CN<DL), либо слишком дискретный характер

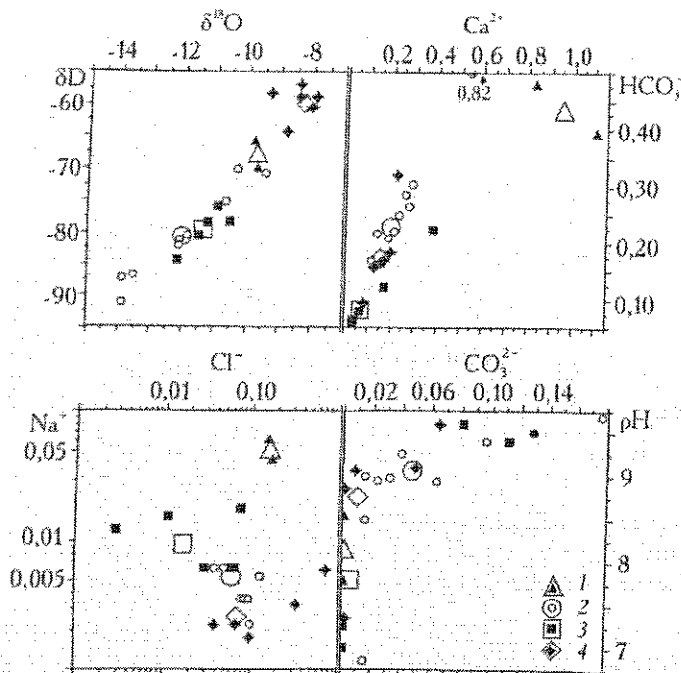


Рис. 3. Линейная корреляция изотопно-геохимических параметров различных классов и семейств природных вод и льдов нивально-гляциального комплекса «Бергшруд» (точки 43–44 на рис. 1; маленькие значки — значения в отдельных образцах, большие — выборочные средние значения и  $X_e, E_e$ ): 1 — WRP, 2 — SFI, 3 — IEG, 4 — IEC (см. табл. 1)

Fig. 3. Linear correlation of isotope-geochemical parameters for various classes and families of natural ice and water of the NGC «Bergshrud» (sites 43–44 at Fig. 1; small signs — in separate samples, the big ones — selected mean  $X_e, E_e$ ): 1 — WRP, 2 — SFI, 3 — IEG, 4 — IEC (see Table 1)

(разрешающая способность методики измерений при  $CN > DL$  в большинстве случаев сопоставима с  $CN$  до порядку величины). Тем не менее очевидна группировка характеристик всех рассматриваемых классов и семейств природных льдов и вод в виде относительно изолированных «областей» или «полей».

Таким образом, даже в пределах единого нивально-гляциального комплекса прослеживается ряд особенностей, присущих различным его компонентам: а) для небольших водотоков на поверхности ледника характерно резко повышенные общая минерализация и концентрации большинства ионов, особенно  $SO_4^{2-}$  и  $Na^+$ ; резко пониженные концентрации  $CO_3^{2-}$ ; относительно «тёплый» изотопный состав; б) снежник — наиболее «размытый», «переходный» (по геохимическим характеристикам) компонент, близкий по химическому и изотопному составу к верхним горизонтам ледникового льда и, отчасти, (только по химическому составу) к конгеляционным льдам; в) ледниковый лёд — самый неоднородный (по амплитуде большинства параметров) компонент при явном уменьшении концентраций большинства ионов (кроме  $Na^+$ ) с глубиной; не исключено, что приповерхностные горизонты (0,2 м) существенно переработаны процессами таяния и инфильтрации талых вод и жидких осадков в летний период (стратиграфически «кора таяния» уверенно выделяется до глубины 0,05–0,10 м); г) конгеляционные льды — «переходный» по химическому составу (см. выше) компонент, основное отличие — резко «отепленный» изотопный состав; по всей вероятности, это связано с формированием конгеляционных льдов преимущественно в весенне-осенний период на основе жидких атмосферных осадков.

Район	Сель	Класс-тип образцов	CE	ZE <sup>+</sup>	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HSSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Na/Cl	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	δ <sup>18</sup> O	δD
NRD	WVW	4															
		49															
		49															
ALD	STN	93															
		8H															
		5	H														
ALD	STN	4															
		4															
		5	H														
LNN	GRN	6															
		3															
		1															
ALD	LNN	3															
		1															
		1															
ALD	WEG	12															
		5															
		23															
ALD	WEP	4															
		4															
		5															
ALD	WLP	10															
		13															
		13															

Рис. 4. Максимальные и минимальные значения геохимических параметров природных льдов и вод Земли Норденшельда (ALD — Альдегонда (ледник и долина), GRN — Грендален (долина), NRD — Земля Норденшельда, STN — Стенброхультдален (долина), LNN — долина Линнея; размерность других параметров и условные обозначения см. на рис. 2)  
 Fig. 4. Maximum and minimum values of geochemical parameters of natural water and ice of Nordenskiöld Land (ALD — Aidegonda Glacier and valley, GRN — Grönalden (valley), NRD — Nordenskiöld Land, STN — Stenbruhulten, LNN — Linneydalen; the units of other parameters and legend signs see on Fig. 2)

## Геохимия природных льдов и вод Земли Норденшельда в целом

Геохимические параметры базовых типов — природных льдов (IEE) и близкими диапазонами изменчивости (рис. 4). Минимальные значения концентрации большинства ионов,  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  обнаруживаются в IEE (точнее, в снеге, фирне и льду ледника Альдегонда). Максимумы большинства ионов и  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  — в WEE (в пересыхающем озере-луже в перигляциальной области этого же ледника, точка 13); общая минерализация SE и концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  максимальны в водоснежной «каше» (WIW) на поверхности наледи. Каждый из базовых типов льдов (IEE и WEE) явно распадается на две и более группы объектов, резко отличных по геохимии.

В составе природных льдов выделяются наледные (IEN) и жильные (IEW), резко отличающиеся от всех остальных повышенными (в десятки и сотни раз) значениями общей минерализации и концентрации большинства ионов (исключение —  $\text{CO}_3^{2-} < 0,12$  мг/л), а также относительно «теплым» изотопным составом. Скорее всего, IEW обязаны своим происхождением замерзанию атмосферных вод, фильтрующихся через почвенно-грунтовой субстрат. Кроме того, жильный лед обогащен огромным количеством минеральных включений, частично растворяющихся при растапливании и хранении образцов. Формирование наледи в долине Линнея связано, по-видимому, с существованием и прорывами карстовых вод из пластов гипса, залегающих по правому борту долины [10]. Именно с частичным растворением гипсов и связано обогащение наледных льдов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ : вблизи наледи и на её поверхности наблюдаются скопления кристаллов гипса, в том числе и в виде «муравьиных куч». Золотым разном гипсовой пыли объясняются, вероятно, и повышенные концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в большинстве природных льдов и особенно вод Земли Норденшельда.

Собственно конгеляционный лед (IEC в бергшунде, см. выше) по геохимическим параметрам является промежуточным, переходным от IEN/IEW к льдам преимущественно атмосферного генезиса (IEA). Вероятно, IEC формировался при промерзании водоема, заполняемого талыми ледниковыми водами и летне-осенними «теплыми» атмосферными осадками при активном растворении относительно многочисленных минеральных частиц золотого генезиса.

Погребенные массивно-пластовые льды (IEB), обнаруженные нами, явно близки по геохимии (как и по другим признакам) к IEA.

В составе природных вод выделяются «околоналедные» воды из долины Линнея. В целом геохимические параметры талых вод близки к составу льдов, которые они дренируют (сравним, например, параметры IEA и WEG для ледника Альдегонда, IEA и WEE для ледника № 14107 на рис. 4), но только в момент непосредственного контакта. За пределами ледника и даже по контакту с ним талые воды суще-

ственно более минерализованы, чем на поверхности ледника (см. параметры WEG, WEB и WEP для ледника Альдегонда на рис. 4). В перигляциальной области воды водоемов (WLP) более минерализованные и «теплые» по значениям  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , чем водотоков (WRP).

### Выводы

Все типы, почти все классы и большинство семейства природных льдов и вод Земли Норденшельда имеют вполне индивидуальный набор геохимических характеристик. Вариации этих характеристик в пределах большинства семейств, не говоря уже о классах и типах, крайне велики: статистически обеспеченная оценка значимости обнаруженных отличий требует существенного увеличения количества образцов по отдельным взятым классам или семействам. Специального изучения заслуживает и методология корректного расчета «кларков» отдельных ионов и в целом «средних» значений геохимических параметров для различных типов, классов и семейства природных льдов и вод.

Тем не менее, полученные данные позволяют даже на полуколичественном уровне (анализ максимумов, минимумов и диапазонов значений) достаточно уверенно отличить природные льды различного генезиса и выделить основные закономерности и этапы формирования их геохимических характеристик, что необходимо для последующего моделирования последних.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке INTAS, грант № 01-2211, а также ведущих научных школ, проект НШ-698 2003.5, Шпицбергенской экспедиции Института географии РАН и Полярной морской геолого-разведочной экспедиции МПР России.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Архипов С.М., Востокова Т.А., Евсеев А.В. Роль минеральных частиц в формировании химического состава деятельного слоя ледников Шпицбергена. — МГИ, вып. 64, 1988, с. 62-71.
2. Архипов С.М., Евсеев А.В., Востокова Т.А. и др. Репрезентативность геохимических характеристик деятельного слоя ледников Шпицбергена. — МГИ, вып. 64, 1988, с. 164-173.
3. Архипов С.М., Москалевский М.Ю., Глазовский А.Ф. и др. Геохимия непротаявшего снежного покрова ледника Коппенген и ледникового плато Амундсена (Шпицберген). — МГИ, вып. 75, 1992, с. 22-35.
4. Архипов С.М., Синькевич С.А., Самойлов О.Ю. Формирование строения субполярных ледников в условиях меняющегося климата. — Режим и эволюция полярных ледниковых покровов. СПб., 1993, с. 116-143.
5. Arkhipov S.M., Mikhalenko V.N., Thompson L.G.

- Structural, stratigraphic and geochemical characteristics of the active layer of the Gregoriev Ice Cap, Tien Shan. — МГИ, вып. 82, 1997, p. 24-32.
6. Clausen H.B., Stampe M., Hammer C.U. et al. Glaciological and chemical studies on ice cores from: Hans Tausen ice cap, Greenland. — Meddelelser om Grønland. Geoscience, v. 39, 2001, p. 123-151.
  7. Goto-Azuma K., Kohshima S., Kameda T. et al. An ice-core chemistry record from Snøfjellaafonna, northwestern Spitsbergen. — Annals of Glaciology, v. 21, 1995, p. 213-218.
  8. Hagen J.O., Liestol O., Roland E., Jorgensen T. Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen. Oslo, Norsk Polarinstitut, Meddelelser № 129, 1993, 169 p.
  9. Kotlyakov V.M., Arkhipov S.M., Henderson K.A., Nagornov O.V. Deep drilling of glaciers in Eurasian Arctic as a source of palaeoclimatic records. — Quaternary Science Reviews, v. 23, 2004, p. 1371-1390.
  10. Salvigsen O., Elgersma A. Large-scale karst features and open taliks at Vardeborgsletta, outer Isfjorden, Svalbard. — Polar Research, № 3, 1985, p. 145-153.

#### SUMMARY

The paper presents the results of quantitative measurements of main isotopic-geochemical characteristics

( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ , pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) for a wide spectrum of water-ice objects: snow and firn cover, snow patches, glacier (including congelation and buried ice), wedge ice, icings, river, lake and bog waters. The level of contemporary variability of parameters for water-ice objects in general was assessed. Main attention has been given to the study of marginal parts of Aldegonda and Stenbrohult glaciers (including periglacial area) and comparative analysis of glacier ice parameters both modern and old (buried) ice. Compound nival-glacial complexes (NGC), forming at the contact of glacier ice with non-glacier surfaces (the glacial marginal zones) could be the most probable source of buried ice of glacier origin.

All types, almost all classes and families of natural ice and waters of Nordenskiöld Land have individual set of geochemical characteristics. Variations of these characteristics in the limits of majority of the families are extremely big. Methodology of correct «clarks» computation for separate ions and in general «mean» values of geochemical parameters for various types, classes, etc. of natural water and ice is also needed to be specially explored. Nevertheless the received data makes possible quite surely even at «semi-quantitative» level (analysis of maximum, minimum and values' diapason) to distinguish natural ice of different origin and understand main regularities and formation stages of their geochemical characteristics.