

ПРИРОДА

№ 7, 2005 г.

**Леин А.Ю., Саввичев А.С.,
Лейбман М.О., Передня Д.Д**

Ледовая летопись: пример расшифровки с помощью изотопных трассеров

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции**



**Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)**

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Ледовая летопись: пример расшифровки с помощью изотопных трассеров

А.Ю.Леин, А.С.Саввичев, М.О.Лейбман, Д.Д.Передня

Огромный информационный потенциал льдов еще очень мало реализован. Во Всемирной программе исследований климата среди главных компонентов климатической системы Земли перечислены атмосфера, гидросфера, литосфера и криосфера. Последняя содержит летопись событий, происходивших во всех перечисленных сферах (и еще в биосфере), поскольку состоит из влаги, заимствованной из атмосферы или гидросферы (океан, подземные воды), а твердая составляющая льдов связана с литосферой.

Интерес к криосфере, особенно к арктическим льдам, с каждым годом возрастает, и в первую очередь из-за грядущего освоения северных территорий с их крупными запасами нефти, газа и различного минерального сырья. Есть и другая сторона такого возрастающего интереса, касающаяся сохранения биосферы и выживания людей на Земле. Имеется в виду угроза климатических катастроф, пока еще локальных, но участвовавших в последние десятилетия, что обычно связывают с деятельностью человека.

Все сказанное заставляет по-новому взглянуть на проблему изучения криосферы в целом и отдельных ее составляющих: мерзлотных пород, поверхностных и подземных льдов и др.

© Леин А.Ю., Саввичев А.С.,
Лейбман М.О., Передня Д.Д., 2005



Алла Юльевна Леин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН. Круг научных интересов охватывает биогеохимические и геохимические исследования циклов углерода и серы. Наш постоянный автор.



Александр Сергеевич Саввичев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН. Область научных интересов — общая микробиология.



Марина Оскаровна Лейбман, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН, специалист по криогенным склоновым процессам и их геоэкологическим последствиям.



Дмитрий Дмитриевич Передня, аспирант того же института. Область научных интересов — мерзлота, пластовые льды, геоэкология.

Вопрос об их генезисе все еще остается остро дискуссионным.

Наряду с классическими гео-криологическими методами в последние два десятилетия стали использовать иные, в частности изотопно-геохимические методы. Так, уже 15 лет продолжают исследования изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтерия (δD) во влаге подземных льдов [1]. Но и этот метод при всей его полезности не всегда отвечает на вопрос о генезисе льдов.

Мы попытались с помощью изотопов серы и углерода получить новую информацию о составе и генезисе подземных пластовых льдов, широко развитых на арктическом побережье России, от Югорского п-ова до Чукотки.

Было проведено изучение стабильных изотопов серы сульфат-иона в расплавах льда для определения источника влаги (атмосферная, морская или подземная вода), а также изотопного состава $\text{C}_{\text{орг}}$ — для установления источника взвеси [2, 3]. Кроме того, к решению вопроса о генезисе пластовых льдов впервые были привлечены радиоизотопные (^{14}C) и микробиологические исследования [4, 5].

Цель нашей работы — сравнить типовые разрезы подземных пластовых льдов и покровных ледниковых льдов Арктики для выявления их сходства и различий.

Материал для исследования отбирался в 2001–2003 гг. из двух обнажений пластовых льдов, расположенных на Чукотке и на Югорском п-ове, и из трех обнажений покровных льдов на островах Колгуев, Новая Земля и Шпицберген. Материал с архипелага Шпицберген частично передан нам сотрудниками «Университетских курсов на Свальбарде» Х.Кристиансен (H.Christiansen). Всего изучено 52 пробы льдов [2, 4].

К пластовым льдам обычно относят залежи подземного льда мощностью от одного до нескольких десятков метров

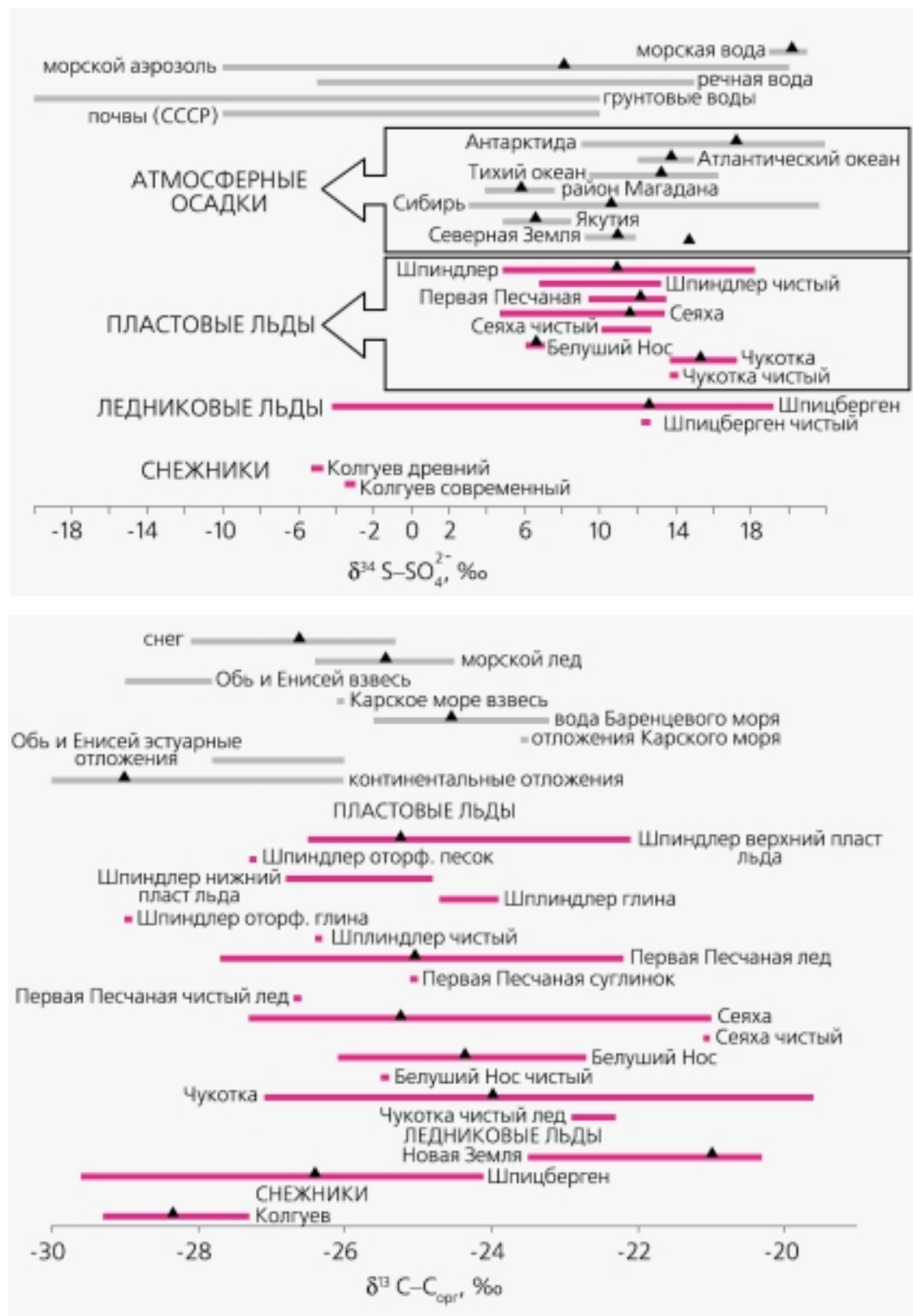


Рис.1. Изотопный состав серы (вверху) сульфат-иона ($\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$) и $\text{C}_{\text{орг}}$ ($\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$) в различных объектах окружающей среды [4, 11, 13]. Цветом выделены данные, полученные авторами. Треугольником показано среднее значение.

и протяженностью до нескольких сотен метров [6]. Большинство отечественных и зарубежных — в первую очередь канадских — исследователей вечной мерзлоты считает, что пластовые льды имеют внутригрунтовое происхождение — сегрегационное, инъекционное или смешанное [7]. Но, наряду с этой гипотезой, обсуждается также образование пластовых залежей

в результате захоронения ледникового льда (т.е. первичноповерхностное происхождение). Впервые такое предположение высказали Ф.А.Каплянская и В.Д.Тарноградский [8].

Таким образом, на сегодняшний день в литературе выделяются пластовые подземные залежи льдов двух основных типов: внутригрунтовые, образующиеся при промерзании во-

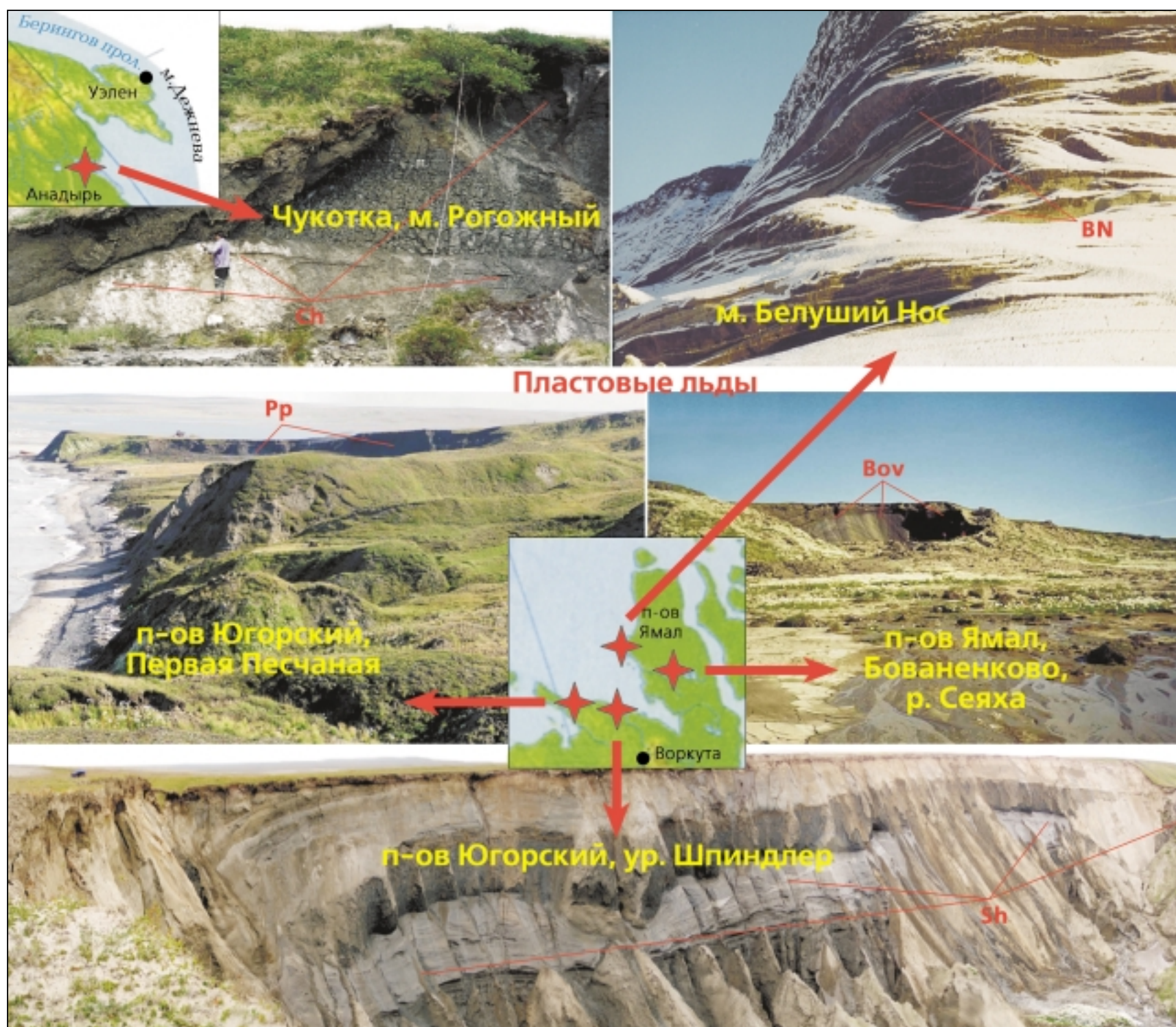


Рис.2. Места изучения залежей пластовых льдов. Индексами указаны точки отбора образцов.

донасыщенных горизонтов отложений, и погребенные первично-поверхностные (глетчерные, снежники и др.). Залежи обоих типов образуются на континентах. Установление природы подземных льдов принципиально важно, поскольку погребенные ледники дают информацию о составе атмосферных осадков во время их формирования и служат свидетельством широкого распространения древнего (плейстоценового) покровного оледенения в регионе. Доказательство внутригрунтовой природы подземных льдов означает, на-

против, локальность распространения покровных ледников и дает возможность судить о составе подземных вод и отложений, вмещающих льды.

Некоторые исследователи выделяют еще один тип пластовых подземных залежей — субмаринный. Их образование связывают с развитием подводных оползней на дне в условиях смятия промерзающих слабо литифицированных морских отложений [9].

Результаты наших исследований подземных льдов на полуостровах Ямал и Югорском (1998—2000) не противоречили

представлениям о преимущественно внутригрунтовой генезисе изученных залежей [3—5]. Вместе с тем на основании полученных данных нельзя исключить и участие первично-ледниковых льдов в формировании подземных пластовых залежей материковой Арктики.

Источником влаги покровных льдов служат атмосферные осадки, обычно твердые в виде снега, в отличие от внутригрунтовых льдов, формирующихся из подземных вод. К сожалению, пределы значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфат-иона подземных вод и атмосферных осадков частично пе-



Рис.3. Основные типы исследованных льдов урочища Шпильдер (Югорский п-ов) и ледника Шокальского (Новая Земля). а — чистые прозрачные стекловидные, б — пузырчатые, в — слоистые с литогенными включениями.

рекрываются (рис.1), что затрудняет интерпретацию изотопных данных. С наибольшей уверенностью можно говорить лишь о присутствии морского сульфата в случае сравнительно высоких концентраций SO_4^{2-} и Cl^- и тяжелого изотопного состава серы сульфат-иона, а также об участии изотопно-легких сульфидов, окисленных до сульфата.

Взвесь в ледниковых льдах формируется главным образом за счет атмосферного переноса с материка в составе аэрозолей [10]. Еще один источник взвеси — продукты денудации пород самих островов, на которых находится ледник. Источниками $\text{C}_{\text{орг}}$ может быть органическое

вещество, перенесенное в составе взвеси или связанное с развитием водорослей в снежниках, из которых впоследствии формируется ледниковый лед.

Изотопный состав $\text{C}_{\text{орг}}$ континентального и морского происхождения различается на 5–10‰ (рис.1).

Подземные пластовые льды

Мы изучали залежи подземных пластовых льдов Западно-Сибирской Арктики (урочище Шпильдер, р.Первая Песчаная, р.Сеяха, Белуший Нос), а также залежь в восточном термоцирке

на мысе Рогожном (Чукотка) на северном побережье залива Онемен в Беринговом море (рис.2).

Результаты изотопно-геохимических исследований приведены на сводных диаграммах значений $\delta^{34}\text{S}$ серы сульфат-иона (рис.1) и значений $\delta^{13}\text{C}$ органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) взвеси во льдах (рис.1).

Изученные нами подземные пластовые льды (рис.3) по текстуре и содержанию в них нерастворимого материала (взвеси) можно разделить на три типа: 1) чистые прозрачные стекловидные; 2) пузырчатые и 3) с прослоями осадочного материала [2–4].

Для определения источника влаги главный интерес представляют чистые льды, поэтому изотопные данные из таких проб выделены в отдельную строку на диаграммах (рис.1).

Сульфат-ион во льдах. В образцах чистых льдов с содержанием взвеси менее 2.5 г/л концентрация сульфат-иона, как правило, минимальная (≤ 3 мг/л). Исключение представляют пробы из залежи мыса Рогожного, где она достигает 18 мг/л (рис.4).

Концентрация сульфат-иона во льдах с литогенными включениями практически не зависит от содержания взвеси (если не считать несколько проб из урочища Шпильдер, где повышение концентрации сульфат-иона связано с окислением осадочных сульфидов взвеси). Не наблюдается также корреляции между концентрацией Cl^- и SO_4^{2-} в расплавах подземных пластовых льдов Западно-Сибирской Арктики, что доказывает гетерогенность источников этих двух ионов. Только в чукотских льдах с ростом концентрации Cl^- растет концентрация сульфат-иона. Это свидетельствует в пользу морского источника влаги, из которой формировались льды мыса Рогожный (рис.5).

Органический углерод взвеси из пластовых льдов Западно-

Сибирской Арктики имеет близкий изотопный состав, доказывающий его преимущественно континентальный источник (рис.1). В чукотских льдах $C_{орг}$ обогащено тяжелым изотопом ^{13}C до -19‰ . В среднем для прозрачных льдов с минимумом взвеси $\delta^{13}C = -22.5\text{‰}$, что характеризует источник этого $C_{орг}$ как морской.

Таким образом, пластовые льды в разрезе мыса Рогожный отличаются от подземных пластовых льдов Западно-Сибирской Арктики морским источником $C_{орг}$, более высокими концентрациями сульфат-иона и обогащением серы сульфат-иона тяжелым изотопом ^{34}S до 17.3‰ (шлировый лед). Повышенные концентрации взвеси характерны только для проб пластового льда на контакте с глинистыми отложениями

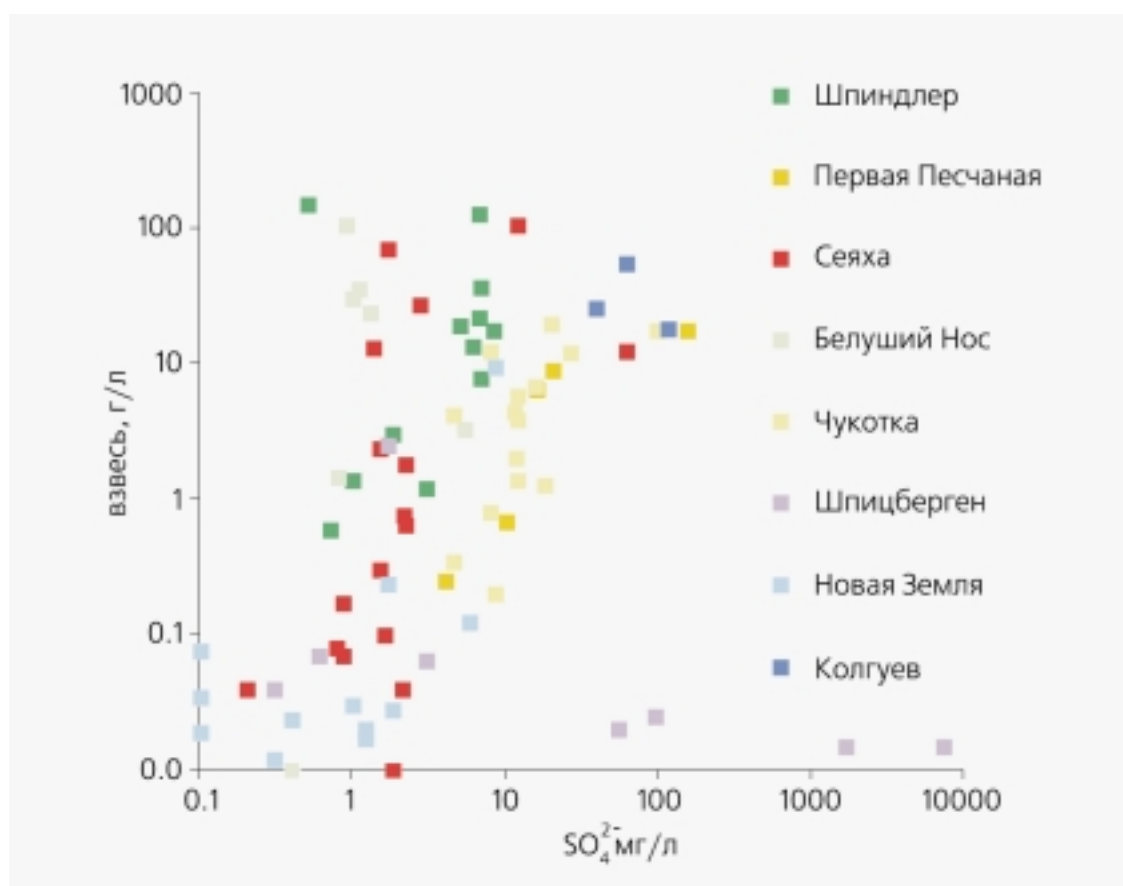


Рис.4. Соотношение концентрации сульфат-иона (SO_4^{2-}) и содержания взвеси в расплавах льдов.

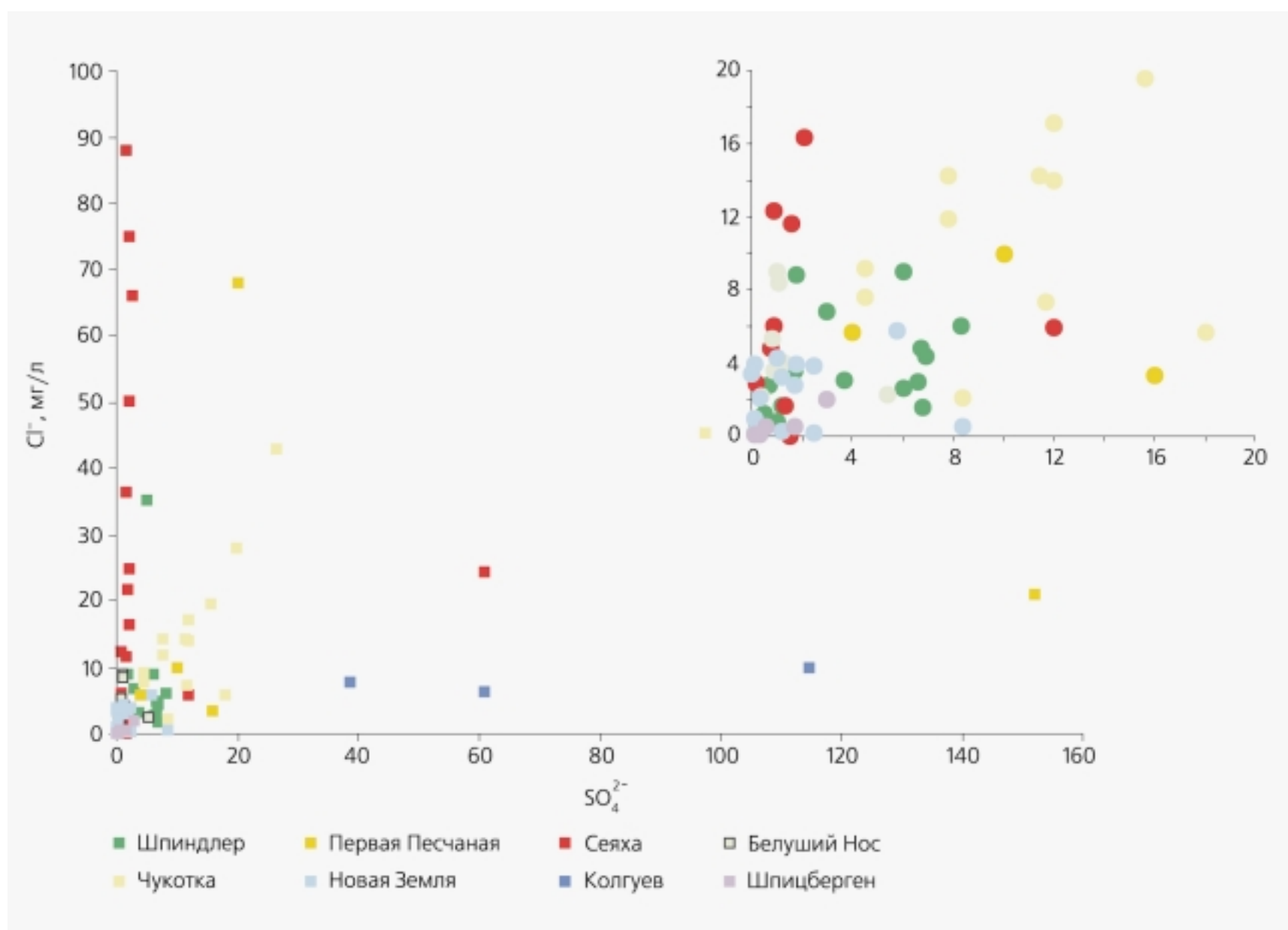


Рис.5. Соотношение концентрации сульфат-иона (SO_4^{2-}) и содержания хлора в расплавах льдов.

и для шлирового льда из глинистых отложений, перекрывающих ледяную залежь.

Поверхностные ледники

Мы исследовали современный и древний снежники на о. Колгуев, мертвый лед ледника Шокальского на северном острове архипелага Новая Земля и лед ледника Альдегонда на архипелаге Шпицберген (рис.6). Все три района расположены в пределах материковой окраины. Они построены из структур континентального типа. Ближе всех расположен к материку о.Колгуев. Он сложен рыхлыми четвертичными отложениями и в отличие от архипелагов Новая Земля и Шпицберген, представляющих собой горные страны складчато-глыбового строения, удаленные от континента, является составной частью обширных приморских равнин арктического севера. Колгуев и Новая Земля входят в южный район Европейского арктического бассейна с интенсивной циклонической деятельностью, а Шпицберген относится к северной части этого бассейна. Покровные ледники составляют 90% площади архипелага. Ледник Альдегонда имеет длину более 4 км и ширину 2 км. Фронт его языка находится в 1.4 км от береговой линии на высоте около 80 м. Самая высокая точка ледника располагается на отметке ~700 м.

В зимнее время к архипелагу Шпицберген поступают два основных циклонических потока: один идет из Норвежского моря, а другой — из Баренцева. В летнее же время острова архипелага находятся вне зоны действия циклонов. На о.Колгуев ветры зимой дуют с северо-запада европейской территории, в том числе с Кольского п-ова, на котором расположены горнодобывающие предприятия, а летом он находится во власти циклонов из Норвежско-

го моря, огибающих Кольский п-ов [12].

Взвесь покровных ледников Арктики в основном состоит из минеральных частиц и органического материала.

Снежники о.Колгуев. Здесь были исследованы древний снежник, захороненный склоновыми осадками (пробы К-6 и К-7), и современный загрязненный снежник (К-10/4), залегающий в днище вторичного термоцирка в непосредственном контакте с древним.

Лед с большим количеством включений из захороненного снежника содержит в два раза больше взвеси по сравнению с современным (33 г/л и 18 г/л соответственно). Современный снежник отличается также максимальной концентрацией сульфат-иона (до 114.81 мг/л), хотя и в древнем снежнике концентрация сульфат-иона повышена по сравнению с пластовыми льдами (рис.4). Сера сульфат-иона сильно обеднена тяжелым изотопом ^{34}S (рис.8). Значения $\delta^{34}\text{S}$ варьируют от -3.5‰ в современном снежнике до -5.4‰ в древней залежи. Объясняется этот необычный изотопный состав (как и в случае со льдами урочища Шпиндлер) высоким содержанием изотопно-легкого пирита (рис.7) во вмещающих осадочных породах и во взвеси. Видимо, при транспортировке к снежнику в составе аэрозольных частиц пирит окисляется до сульфат-иона. Это приводит как к увеличению концентрации SO_4^{2-} , так и к аномально легкому изотопному составу серы сульфат-иона. Увеличение концентрации сульфата в современном снежнике более чем в два раза мы склонны объяснять поступлением дополнительного антропогенного аэрозольного сульфата из горно-обогачительных предприятий (например, с Кольского п-ова). Рудный сульфид (изотопно более тяжелый, чем осадочный) сдвигает значение $\delta^{34}\text{S}$ сульфат-иона современного снежника в сторону изотопного утяжеления на 1‰.

В современном снежнике содержится меньше $\text{C}_{\text{орг}}$ и CH_4 , чем в древнем снежнике. Концентрация метана в сильно загрязненном льду составляет 15–20 ppm, что в 2–5 раз выше по сравнению с пластовыми льдами урочища Шпиндлера. В расплавах из снежников содержится в 10–40 раз больше карбоната-иона, чем в подземных пластовых льдах Югорского п-ова.

Органический углерод взвеси (рис.8) имеет легкий изотопный состав, что свидетельствует, скорее всего, о континентальном источнике этого углерода, поступающего в снежник в составе аэрозоля.

Льды архипелага Новая Земля. Содержание взвеси в мертвых льдах ледника Шокальского и в снежнике из Русской Гавани не превышает сотых долей грамма на литр талой воды. Исключение представляет небольшая прослой полосчатого льда, где наблюдается также самая высокая концентрация сульфат-иона.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ органического углерода взвеси, изменяющиеся от -20.1 до -23.5‰ , говорят о минимальном участии континентального $\text{C}_{\text{орг}}$ в аэрозольном переносе (рис.1, 8).

Ледник Альдегонда на Шпицбергене. Все пробы мертвого льда с поверхности (Bb 1) и с подошвы (из базальной зоны, Bb 2) ледника содержат, как правило, мало взвеси (сотые доли г/л) и мало сульфат-иона. Близкие величины концентрации взвеси были получены в поверхностном слое снежного покрова на дрейфующих льдинах в Арктике [10]. Только в пробе льда с видимыми включениями пелитового материала содержание взвеси достигало 2.5 г/л (Bb 1/6).

Значения $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$ из чистого льда с концентрацией взвеси 0.014 — 0.07 г/л лежат в пределах $-26.7 \dots -29.6\text{‰}$, что предполагает континентальный источник взвеси (рис.1). В пробах с большим количеством литогенных включений (2.5 г/л) изо-

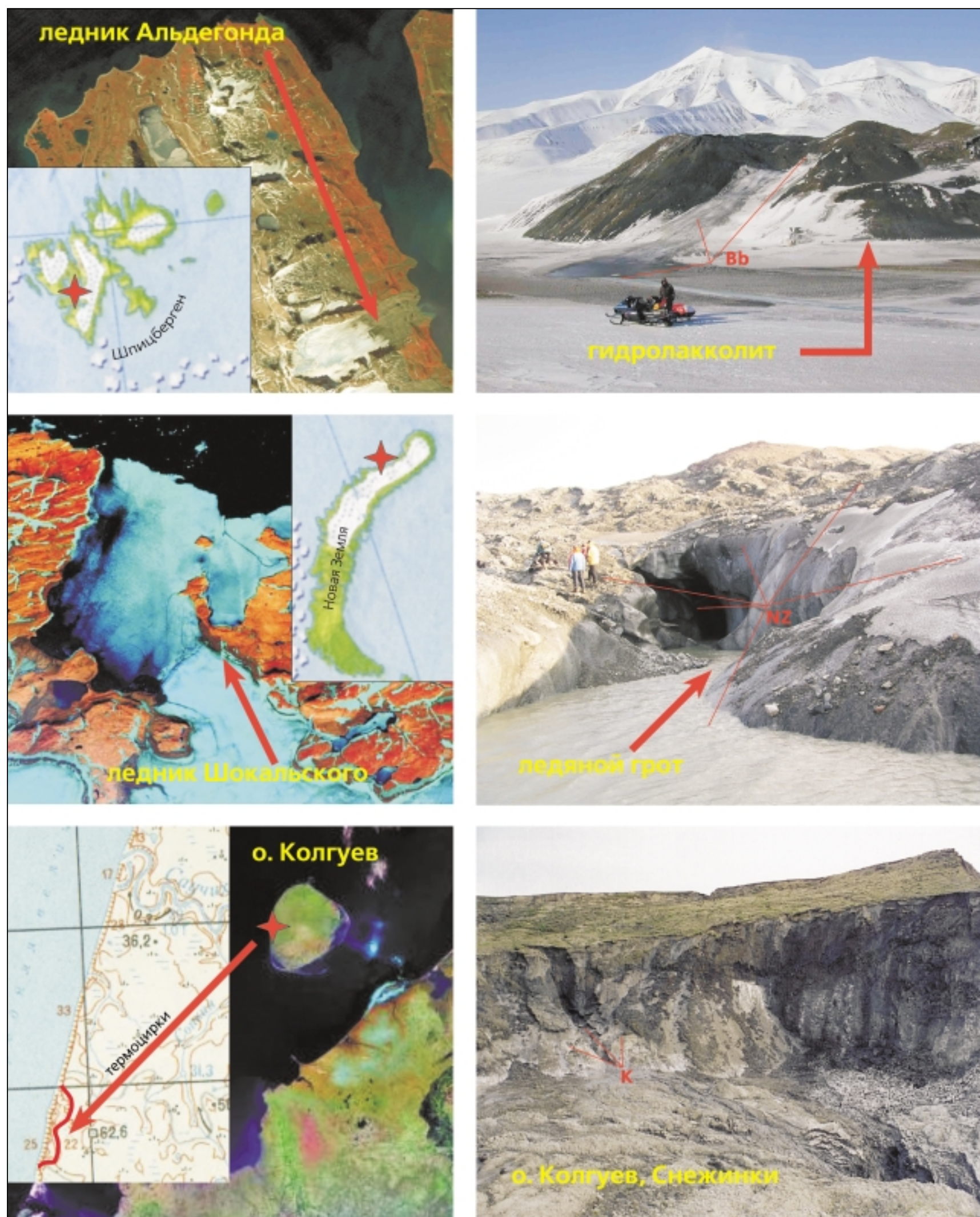


Рис.6. Места изучения залежей покровных (первично-поверхностных) льдов. Индексами указаны точки отбора образцов.

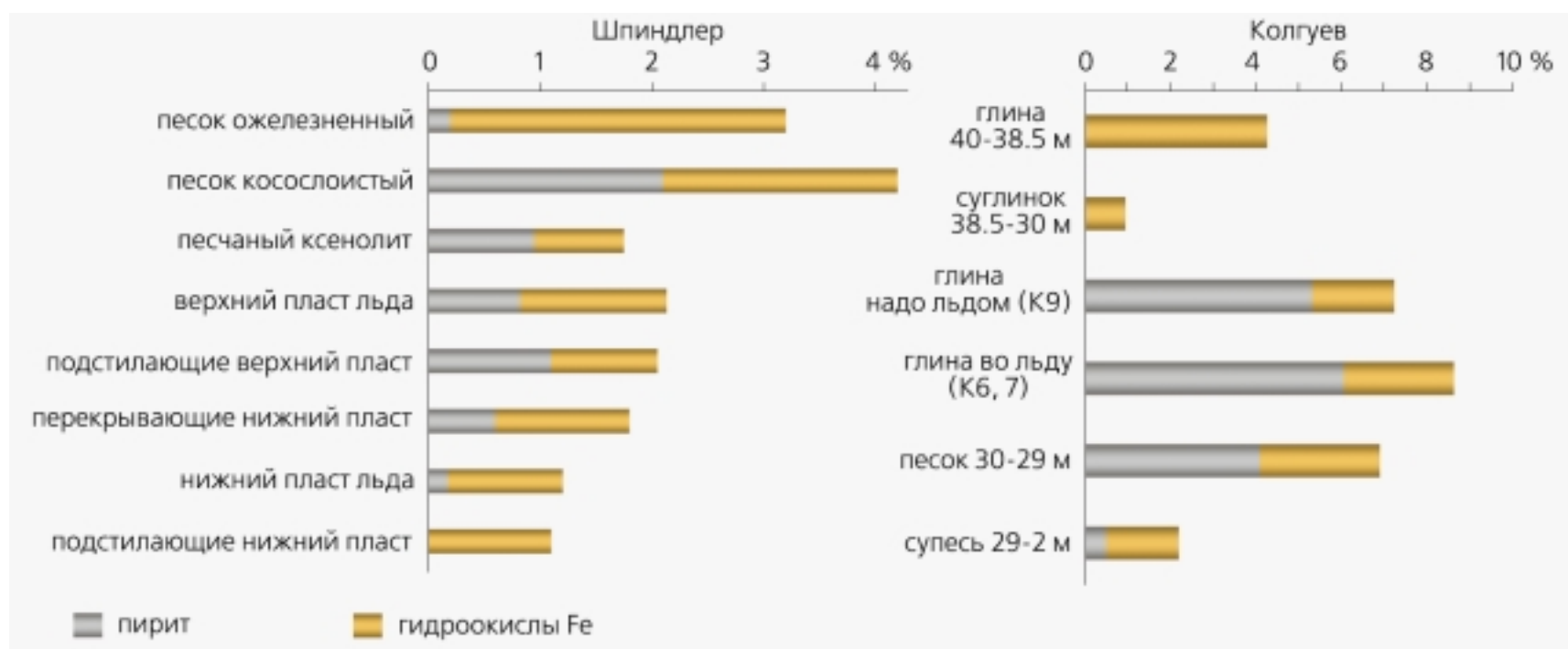


Рис.7. Изменение содержания пирита и гидроокислов железа по вертикальным профилям разрезов урочища Шпиндлер и о.Колгуев.

топный состав C_{org} утяжеляется за счет органического материала, поступающего с окружающих склонов.

Сходство и различие. Как следует из значения $\delta^{34}S$ сульфат-иона и $\delta^{13}C-C_{org}$ всех изу-

ченных проб (рис.8), разброс этих величин чрезвычайно широк и составляет 23‰ для $\delta^{34}S$ сульфат-иона расплава и 10‰ для $\delta^{13}C-C_{org}$ взвеси, что доказывает гетерогенность источников серы и органического угле-

рода во льдах. В первую очередь это зависит от их разного удаления от континента и от направления атмосферных циклонических потоков.

На о.Колгуев древний снежник несет явные следы влияния

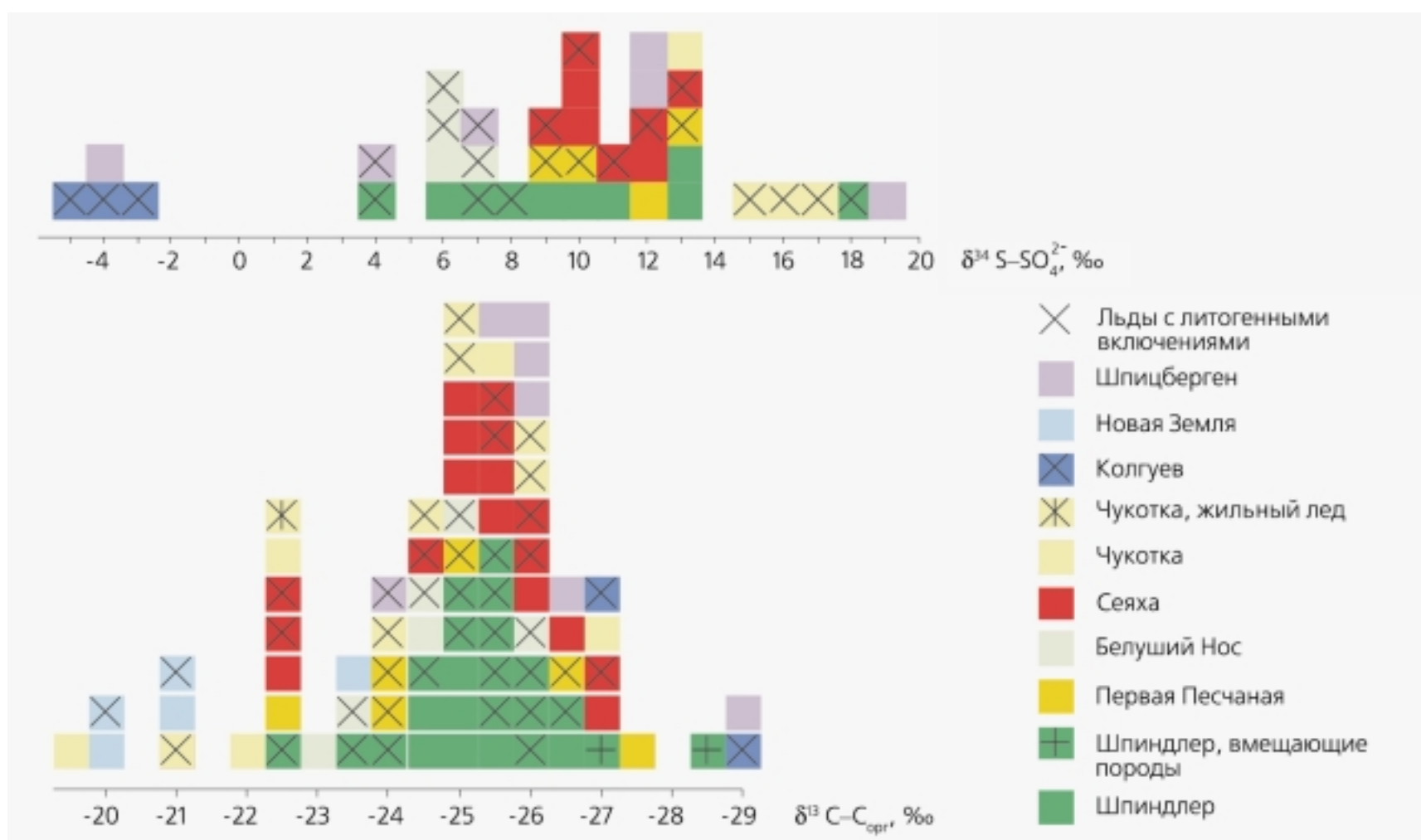


Рис.8. Гистограмма изотопного состава серы в расплавах льда и во вмещающих породах (вверху) и углерода органического вещества взвеси из расплавов льда.

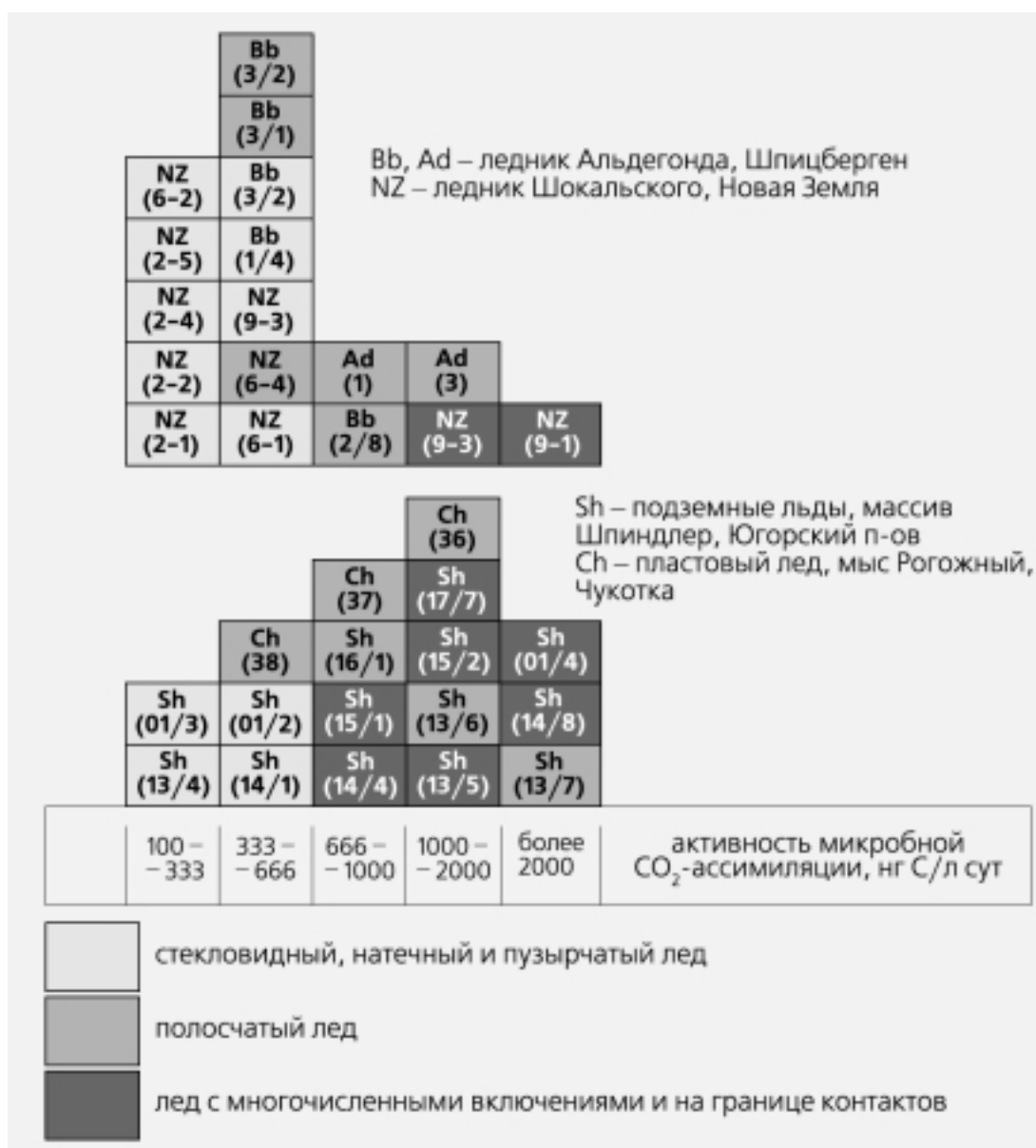
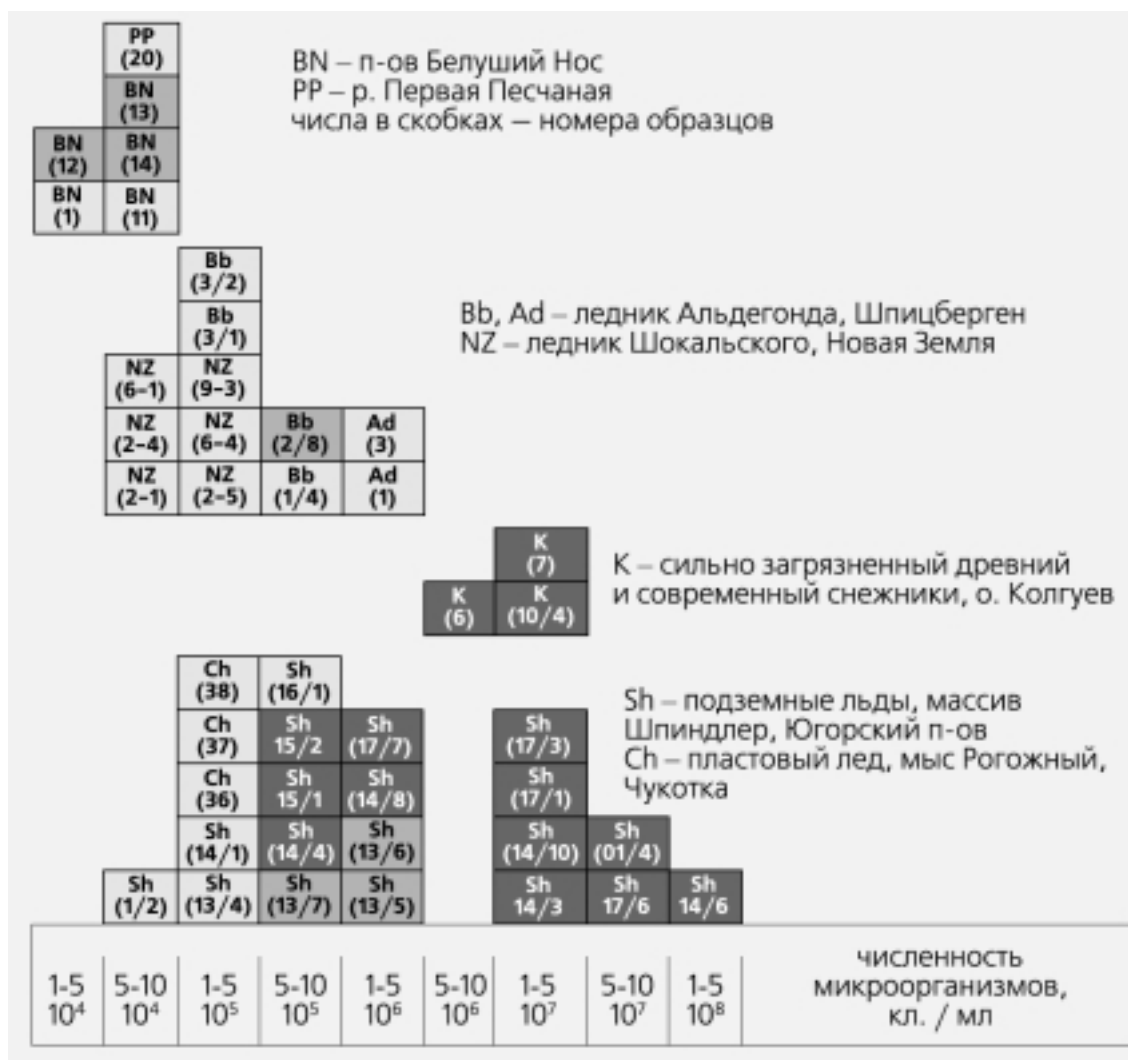


Рис.9. Численность микроорганизмов (вверху) и активность микробной CO₂-ассимиляции в образцах льда различного генезиса.

континентального переноса: сера сульфат-иона расплава из снежников образована в результате окисления изотопно-легкой сульфидной серы (пирита) из осадочных отложений. Органическое вещество взвеси из снежников также имеет преимущественно континентальное происхождение. Современный снежник отличается от древнего повышенной (вдвое) концентрацией сульфат-иона и некоторым обогащением серы изотопом ³⁴S. Это легче всего объяснить участием дополнительных порций антропогенной серы сульфат-иона, образовавшегося при окислении более изотопно-тяжелых рудных сульфидных минералов при их переносе с континента в составе аэрозолей.

В ледниках архипелага Шпицберген сульфат-ион также обеднен изотопом ³⁴S за счет окисления сульфидных минералов, например за счет пирита из угольных отвалов.

Судя по обогащению C_{орг} взвеси тяжелым изотопом ¹³C, ледник Шокальского на архипелаге Новая Земля не испытывает серьезного влияния материала с континента. Происхождение C_{орг} с таким изотопным составом, скорее всего, связано с массовым летним развитием микроводорослей на поверхности льда.

Численность микроорганизмов в расплавах подземных и поверхностных залежей льдов зависит от количества взвеси во льдах [13]: в чистых прозрачных разностях содержится (1–5)·10⁴, а в полосчатых льдах – (1–5)·10⁸ кл/мл (рис.9). Присутствие жизнеспособных микроорганизмов во льдах подтверждено биогеохимическими исследованиями, которые показали, что скорость ¹⁴CO₂-ассимиляции в расплавах льда изменяется независимо от типа залежи от 100 нг С/л·сут в прозрачных льдах до более 2000 нг С/л·сут в полосчатых льдах с большим количеством взвеси (рис.9).

* * *

Итак, значительный разброс величин $\delta^{34}\text{S}$ сульфат-иона льдов из различных залежей (от -5.4 до $+19.0\%$) свидетельствует о гетерогенности источников серы сульфата. Легкий изотопный состав (особенно отрицательные значения) сульфат-иона однозначно говорит об участии осадочных или рудных сульфидов в его образовании.

Пластовые льды Чукотки по своим изотопно-геохимическим параметрам ($\delta^{34}\text{S}$ и $\delta^{13}\text{C}$) заметно отличаются от подземных пластовых залежей Запад-

но-Сибирской Арктики. Тяжелый изотопный состав сульфат-иона ($\sim\delta^{34}\text{S} = 19.0\%$) свидетельствует наряду с другими признаками об участии морской влаги в формировании льдов Чукотки. Для этих льдов установлен также морской источник $\text{C}_{\text{орг}}$ во взвеси.

Проведенные исследования ледниковых льдов на трех островах, испытывающих влияние разнонаправленных циклонов и расположенных на разном расстоянии от континента, доказали разный источник сульфат-иона во влаге, из которой формируются эти льды, и раз-

ный источник взвеси. Изотопный состав сульфат-иона может и должен использоваться для оценки доли антропогенной серы в составе снежников. На примере современного и древних снежников о. Колгуев с уверенностью можно сказать, что физико-географические условия и циркуляция аэрозольных потоков сохраняются в этом районе Арктики уже более 100 лет. ■

Авторы благодарят Б.Г.Вайнштейна за содействие в выполнении ряда химических и минералогических анализов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС. Проект 01-2211.

Литература

1. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геоэкологии и гляциологии. М., 2000.
2. Леин А.Ю., Лейбман М.О., Пименов Н.В., акад. Иванов М.В. // Докл. РАН. 2000. Т.374. №2. С.235—237.
3. Leibman M.O., Lein A.Yu., Hubberten H.W. et al. Isotope-geochemical characteristics of tabular ground ice at Yugorsky peninsula and reconstruction of conditions for its formation // Материалы гляциологических исследований. 2001. Вып.90. С.30—39.
4. Леин А.Ю., Лейбман М.О., Саввичев А.С. и др. // Геохимия. 2003. №10. С.1084—1104.
5. Leibman M.O., Lein A.Yu., Vanshtein B.G. et al. Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotope-geochemical reconstruction of conditions for its formation // Proceedings of the 8th International conference. Zurich, 21—25 July 2003. Lisse, Netherlands, 2003. P.645—650.
6. Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М., 1975.
7. Лейбман М.О., Васильев А.А., Рогов В.В., Ингольфсон О. // Криосфера Земли. 2000. Т.IV. С.31—40.
8. Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. // Докл. АН СССР. 1976. Т.231. №8470. С.1185—1187.
9. Шполянская Н.А. Арктический шельф и вечная мерзлота // Природа. 2005. №1. С.53—60.
10. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградов А.А. и др. Новый взгляд на влияние эолового переноса на современное морское осадконакопление и окружающую среду в Арктике. Результаты исследования аэрозолей и снежного покрова // Новые идеи в океанологии. М., 2004. Т.2. С.168—214.
11. Stable Isotopes. Natural and anthropogenic sulphur in the Environment / Eds H.R.Krouse, V.A.Grinenko. Chicester, 1991.
12. Трешников А.Ф., Сальников С.С. Северный Ледовитый и Южный океаны. Л., 1985.
13. Саввичев А.С., Русанов И.И., Мицкевич И.Н. и др. Особенности биогеохимических процессов круговорота углерода в водной толще, донных осадках, ледовом и снеговом покрове Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М., 2001. С.394—409.