

Вклад России в Международный полярный год 2007/08
Series: Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08

Полярная криосфера и воды суши

Polar Cryosphere and Continental Waters

Главный редактор тома
В.М. Котляков

Editor-in-chief
V.M. Kotlyakov

Редакционная коллегия
Д.А. Гиличинский, В.Г. Дмитриев, Д.С. Дроздов,
В.Я. Липенков, М.Ю. Москалевский, И.А. Шикломанов

Editorial Board
D.A. Gilichinsky, V.G. Dmitriev, D.S. Drozdov,
V.Ya. Lipenkov, M.Ju. Moskalevsky, I.A. Shiklomanov

Paulsen Editions. Москва – Санкт-Петербург
2011

Paulsen Editions. Moscow – Saint-Petersburg
2011

УДК [551.3+551.58+556](211)
ББК 26

Полярная криосфера и воды суши. – М.: Paulsen, 2011. – 320 с.: ил. – ISBN 978-5-98797-044-7

Макет, верстка *Д.П. Глазков, А.В. Гончарова*

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ ПО УЧАСТИЮ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ПОДГОТОВКЕ
И ПРОВЕДЕНИИ В 2007–2008 гг.
МЕЖДУНАРОДНОГО ПОЛЯРНОГО ГОДА**

Редакционный совет

А.И. Бедрицкий (сопредседатель)
А.Н. Чилингаров (сопредседатель)
В.М. Котляков (заместитель председателя)
Ю.Г. Леонов (заместитель председателя)
Г.Г. Матишов (заместитель председателя)
И.Е. Фролов (заместитель председателя)
В.Г. Дмитриев (ответственный секретарь)

*Л.И. Абрютина, Г.В. Алексеев, Е.Н. Андреева, И.М. Ашик, В.Г. Блинов,
Д.А. Гиличинский, В.М. Грузинов, А.И. Данилов, Г.Н. Дёгтева, В.В. Денисов,
Д.С. Дроздов, Н.А. Зайцева, В.Д. Каминский, А.В. Клепиков, Ю.А. Лаврушин,
Г.Л. Лейченко, В.Я. Липенков, В.М. Макеев, В.А. Мартыщенко,
М.Ю. Москалевский, И.И. Мохов, А.В. Неелов, В.Ф. Радионов, Л.А. Тимохов,
А.А. Тишков, А.В. Фролов, И.Е. Фролов, В.Н. Шеповальников, И.А. Шикломанов*

Серия «Вклад России в Международный полярный год 2007/08»:
Полярная атмосфера
Океанография и морской лёд
Полярная криосфера и воды суши
Строение и история развития литосферы
Наземные и морские экосистемы
Качество жизни и социально-экономическое развитие полярных регионов
Итоги МПГ 2007/08 и перспективы российских полярных исследований

Фотография на суперобложке «Выводной ледник Шохальского. Арх. Новая Земля».
Фото А. Ф. Глазовского

ISBN 978-5-98797-044-7

© Paulsen ААНИИ
© Paulsen ААRI

Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ

В.Я. Липенков¹, В.В. Лукин¹, С.А. Булат², Н.И. Васильев³,
А.А. Екайкин¹, Г.Л. Лейченков⁴, В.Н. Масолов⁵, С.В. Попов⁵,
Л.М. Саватюгин¹, А.Н. Саламатин⁶, Ю.А. Шибаев¹

1 – Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Петербургский институт ядерной физики, г. Санкт-Петербург, Россия

3 – Санкт-Петербургский государственный горный институт, г. Санкт-Петербург, Россия

4 – Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана, г. Санкт-Петербург, Россия

5 – Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Ломоносов, г. Санкт-Петербург, Россия

6 – Казанский государственный университет, г. Казань, Россия

В период МПГ был в основном завершен первый этап изучения подледникового озера Восток, когда применялись дистанционные геофизические методы и комплексный анализ кернов озерного льда, поднятых на поверхность в результате продолжения бурения Антарктического ледникового покрова на станции Восток. Завершены работы по картированию озера. Получен большой объем новых данных о строении, газосодержании, изотопном и биологическом составе озерного льда до глубины, достигнутой скважиной (3667 м). Критический обзор результатов исследований, полученных на этом этапе, показывает, что только проникновение в озеро с отбором проб подледниковой воды позволит дать окончательные ответы на ключевые вопросы, касающиеся гидрологического, газового, изотопного и биологического режимов этого уникального водоема.

1. Введение

Озеро Восток, которое по площади водной поверхности лишь немногим уступает крупнейшему в Европе Ладожскому озеру, заметно выделяется своими грандиозными масштабами среди других подледниковых водоемов, обнаруженных в Антарктиде методами радиолокационного и сейсмического зондирования. Возникновение, развитие и современный режим этого уникального водоема тесно связаны с геологическим строением, историей климата и оледенения шестого континента. Благодаря своим внушительным размерам (60×260 км, мощность водного слоя достигает 1200 м), озеро Восток занимает центральное место в подледниковой гидрологической системе Антарктиды, во многом определяющей форму и динамику современного Антарктического ледникового покрова в условиях меняющегося климата планеты.

История возникновения озера достоверно не установлена. Теоретически показано, что оно могло существовать задолго до начала оледенения Антарктиды около 30 млн лет назад (Зотиков, Даксбери, 2000). Большинство исследователей, однако, склоняется к тому, что озеро возникло как подледниковый водоем в результате донного таяния ледника во время или

после образования континентального ледникового покрова в его современных масштабах 15 млн лет назад (*Jouzel et al., 1999*).

С точки зрения биологов озеро Восток – это прежде всего уникальная водная экосистема, практически изолированная от земной атмосферы и поверхностной биосферы на протяжении миллионов лет. Тектоническая природа озера и его продолжительная изоляция предполагают возможность сохранения здесь реликтовых форм жизни и проявления еще не известных науке путей эволюционной адаптации микроорганизмов. Экстремальные условия подледникового водоема делают его идеальной экспериментальной площадкой для отработки в земных условиях методов и технологий поиска следов жизни на покрытых льдом планетах и лунах Солнечной системы.

Повышенный интерес мирового научного сообщества к исследованию озера Восток и других подледниковых систем Антарктиды нашел отражение в решении Научного комитета по исследованию Антарктики (SCAR) создать в своей структуре научно-исследовательскую программу «Подледниковые озера Антарктиды» (Subglacial Antarctic Lake Environments–SALE) и рекомендовать исследования подледниковой среды в качестве одного из приоритетных направлений программы Международного полярного года 2007–2008 в Антарктике.

В нашей стране комплексные исследования подледникового озера Восток проводятся в рамках специального проекта подпрограммы «Исследование и изучение Антарктики» Федеральной целевой программы «Мировой океан». Значительная часть работ по этому проекту в период подготовки и проведения Международного полярного года была тесным образом связана с реализацией национальной программы МПГ и рассматривалась как вклад России в выполнение международного проекта МПГ SALE-UNITED. В работах участвовало восемь российских научно-исследовательских учреждений, деятельность которых координировалась ААНИИ Росгидромета и охватывала все важнейшие технологические и научные направления изучения подледниковых озер Антарктиды, сформулированные в международной программе SALE.

Разработкой технологий и средств кернавого бурения льда и экологически безопасного проникновения в подледниковые водоемы занимался Санкт-Петербургский государственный горный институт (СПГИ) в сотрудничестве с ААНИИ. Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ) проводила в составе Российской антарктической экспедиции (РАЭ) наземные дистанционные исследования озера средствами сейсмического зондирования и радиолокационного профилирования. Изучением минеральных включений донных осадков озера в ледяных кернах, поднятых на станции Восток, занимались ученые Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология) и Всероссийского научно-исследовательского геологического института (ВСЕГЕИ). Газовые и изотопные анализы образцов керна льда из озера Восток выполнялись специалистами ААНИИ. Институт микробиологии (ИНМИ) РАН и Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ) РАН проводили биологические исследования ледяных кернов методами молекулярной биологии и классической микробиологии.

В исследованиях керна озерного льда принимали участие французские специалисты из Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (ЛГГОС, г. Гренобль). Они предоставляли для совместных работ специаль-

ные «чистые комнаты», необходимые для деконтаминации образцов льда, выполняли химический контроль остаточного загрязнения биологических проб и оказывали техническое содействие в проведении газовых и изотопных анализов ледяных кернов.

Полученные в ходе полевых и лабораторных исследований данные обобщались и согласовывались в процессе создания математических моделей, описывающих динамику ледникового покрова (Казанский государственный университет), циркуляцию озера, его газовый и изотопный режимы (ААНИИ), а также при создании геологических моделей происхождения озера Восток (ВНИИОкеангеология, ПМГРЭ).

В настоящей статье дан обзор основных результатов российских исследований подледникового озера Восток в период с 2005 по 2009 г.

2. Дистанционные геофизические исследования

Дистанционные геофизические исследования озера Восток проводились специалистами ПМГРЭ и РАЭ средствами сейсмического зондирования и наземного радиолокационного профилирования. В задачи работ входило определение морфометрических и геофизических характеристик ледникового покрова, водного слоя, осадочных пород и подстилающего их кристаллического фундамента, выяснение геоморфологических особенностей подледного ландшафта, а также картирование береговой линии озера. В период МПГ работы по картированию озера Восток были успешно завершены. Общая длина геофизических маршрутов, выполненных российскими исследователями в районе озера, к 2008 г. превысила 6000 км, а число пунктов сейсмических зондирований составило 320 (рис. 1).

По результатам наземного радиолокационного профилирования ледника в районе озера Восток были построены карты внутренних (изохронных) поверхностей отражения в теле ледникового покрова (Мандрикова и др., 2005; Попов и др., 2007). Выделены и протрассированы по всей площади озера четыре наиболее контрастные изохронные поверхности. Они пересекают скважину на станции Восток на глубинах 600, 1060, 1900 и 2180 м и датируются возрастами 34,8, 73,0, 131,1 и 160,4 тыс. лет согласно хроностратиграфической шкале ледяного керна скважины 5Г (Salamatina et al., 2004). Использование этих данных при моделировании течения ледника позволило рассчитать распределение возраста и температуры льда по глубине в районах, удаленных от пункта бурения, а также уточнить палеоклиматические реконструкции, построенные по данным ледяного керна со станции Восток (Salamatina et al., 2009; Цыганова и др., 2010).

С целью построения карт, наиболее точно характеризующих морфометрические и батиметрические параметры озера Восток, данные российских наземных геофизических исследований были объединены с результатами аэрогеофизической съемки, выполненной сотрудниками Ламонтской геофизической обсерватории (Studinger et al., 2003, 2004) в летний антарктический сезон 2000/01 г. (см. рис. 1). Для описания дневной поверхности ледника использовались данные лазерного альтиметра GLAS спутника ICESat (Dimarzio et al., 2007). Синтез всей имеющейся информации был впервые выполнен в работах российских исследователей (Попов, Черноглазов, 2011; Попов и др. 2011). На рис 2 а, б приведены построенные по обобщенным данным гипсометри-

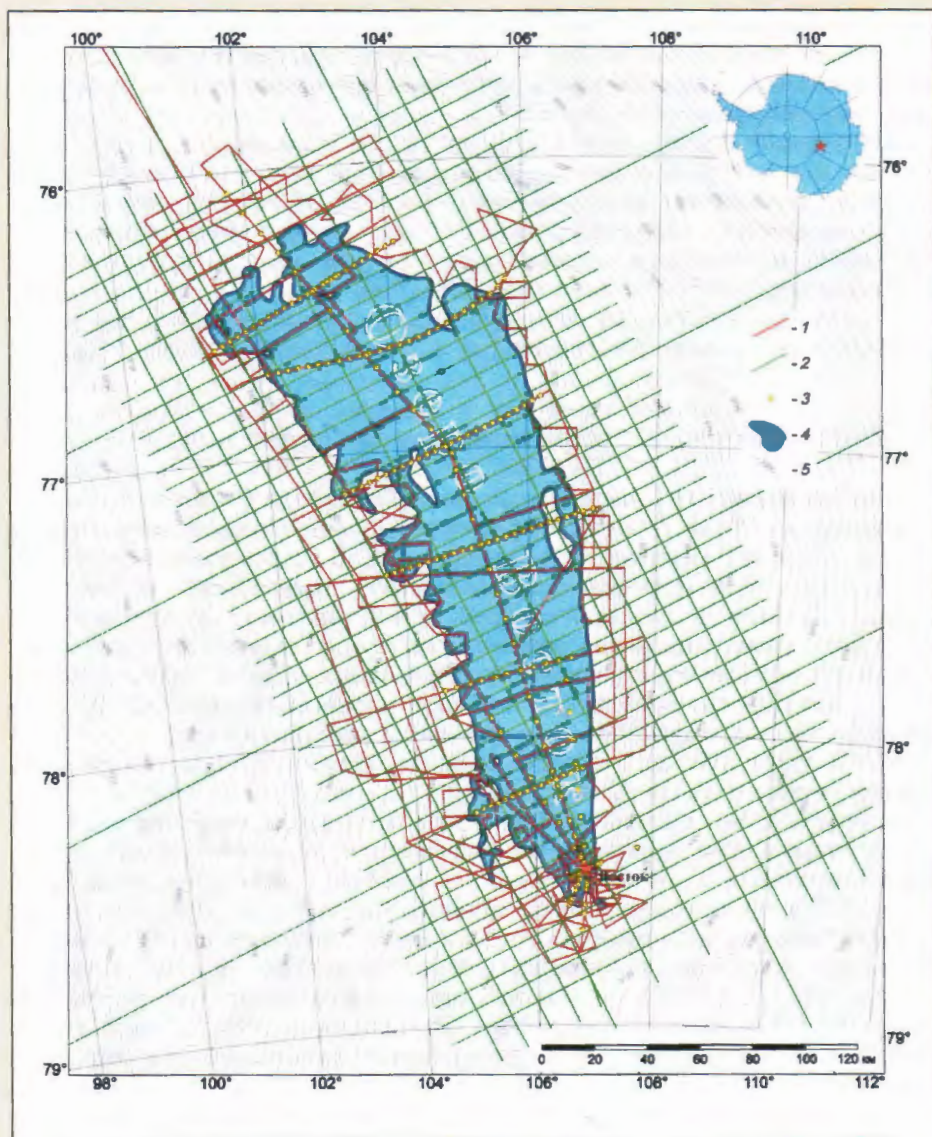


Рис. 1. Маршруты российских научных походов и американских авиационных геофизических исследований в районе озера Восток (Попов и др., 2011):
 1 – маршруты наземного радиолокационного профилирования ПМГРЭ (1998–2008 гг.); 2 – маршруты геофизической аэросъемки Ламонтской геофизической обсерватории (США) в антарктический полевой сезон 2000/01 г.;
 3 – пункты сейсмических зондирований ПМГРЭ (1995–2008 гг.);
 4 – область распространения водной поверхности озера Восток;
 5 – изогипсы высот дневной поверхности ледника

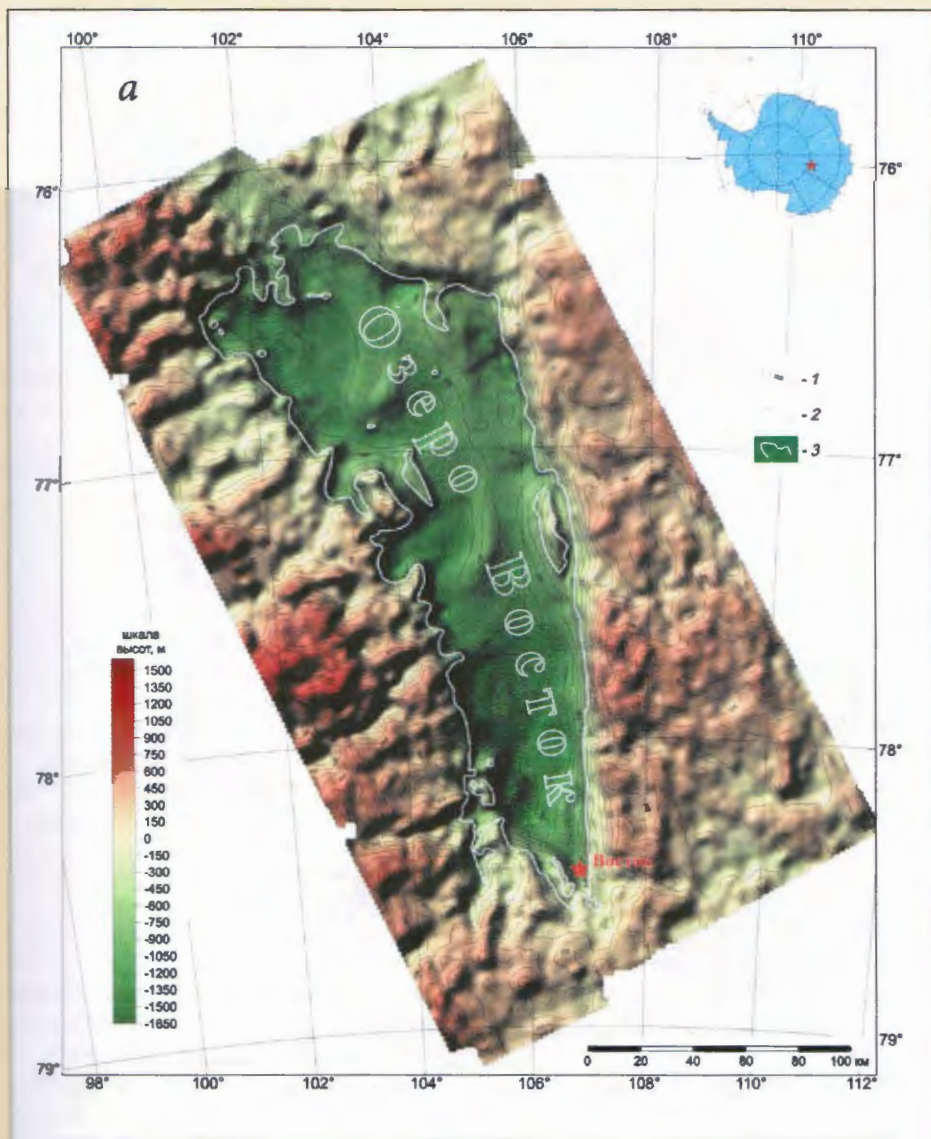


Рис. 2 а. Карта высот коренного рельефа подледникового озера Восток (Попов и др., 2011).
 1 – изогипсы подледного рельефа в метрах (сечение 150 м);
 2 – уровень моря; 3 – береговая линия озера.

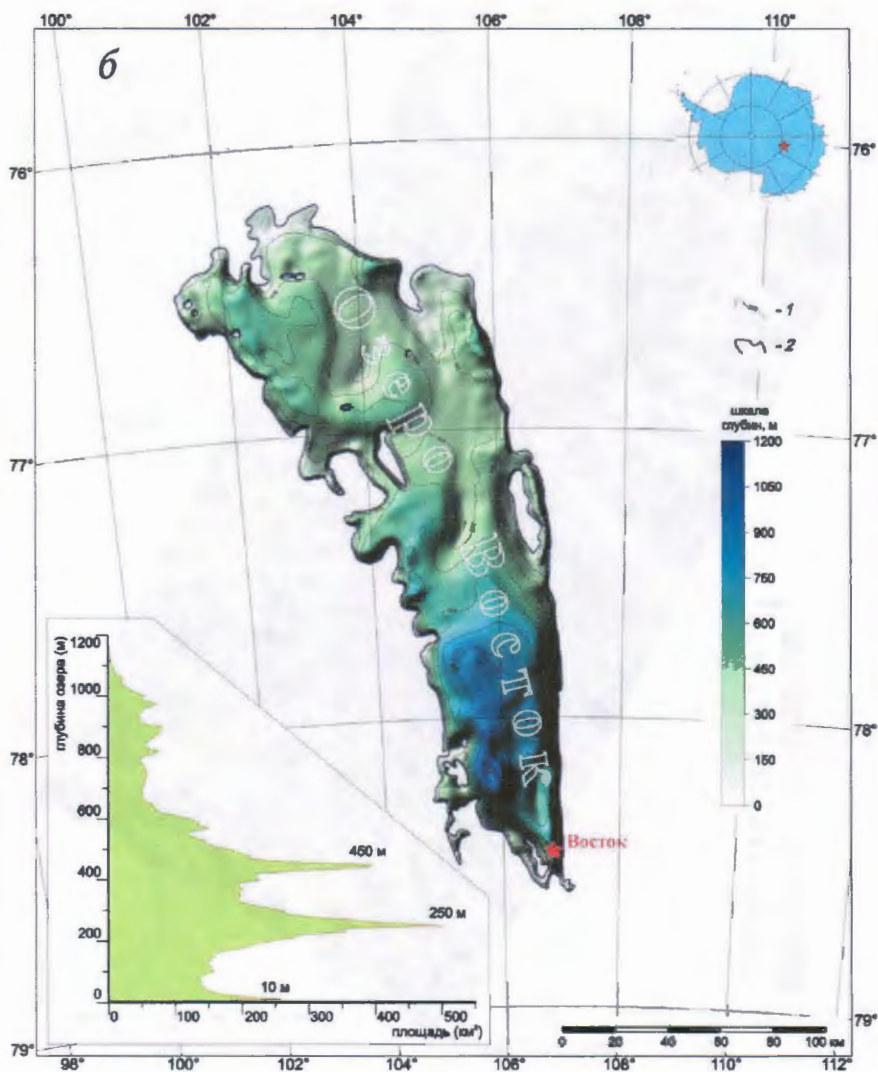


Рис. 2 б. Карта глубин б подледникового озера Восток (Попов и др., 2011).
 1 – изобаты в метрах (сечение 150 м); 2 – береговая линия озера;
 на врезке – батиметрическая кривая, показывающая распределение площади
 озера по глубинам (толщинам) водного слоя

ческая карта коренного рельефа Антарктиды в районе озера Восток, батиметрическая карта глубин (толщин водного слоя) озера, а также батиметрическая кривая, показывающая распределение площади озера по глубинам. Основные морфометрические характеристики озера приведены в табл. 1.

К настоящему времени не получено достоверных данных о мощности рыхлых осадков и консолидированных осадочных отложений, заполняющих депрессию озера Восток. Мощность осадочного чехла была рассчитана специалистами ПМГРЭ как разность между глубиной залегания границы магнитных пород и глубиной дна озера по сейсмическим данным, исходя из предположения, что осадочный чехол сложен немагнитными породами. Согласно полученным модельным оценкам, общая мощность немагнитного слоя осадочных пород в нижней части котловины Восток достигает 4 км, что хорошо согласуется с результатами моделирования по аэрогравиметрическим данным и в целом не противоречит существующим представлениям о тектонической природе депрессии озера Восток (*Studinger et al., 2003; Лейченко и др., 2005*).

Сейсмологические наблюдения, выполненные вблизи станции Восток методом обменных волн землетрясений, позволили получить важные характеристики земной коры, указывающие на рифтовую природу озера Восток и возможность существования повышенного геотермального потока в районе озерной котловины (*Исанина и др., 2009*). Установлено, что земная кора здесь имеет мощность 34–36 км и состоит из трех блоков, один из которых (клиновидный, опущенный) расположен непосредственно под озером. «Озерный» блок характеризуется пониженной скоростью распространения сейсмических волн и повышенной расслоенностью. Зона разломов, отделяющая его от соседних блоков, прослеживается до глубины 20 км.

Накопленной к настоящему времени геофизической информации вполне достаточно, чтобы охарактеризовать озеро Восток как географический объект и обоснованно говорить о его тектонической природе. Вместе с тем, строение земной коры, возраст заложения депрессии озера Восток, ее тектоническое положение в структуре Восточно-Антарктического кратона все еще остаются не вполне ясными.

3. Продолжение kernового бурения глубокой скважины на станции Восток

Российская антарктическая станция Восток расположена над южной глубоководной частью озера, где происходит намерзание озерной воды на подошву ледникового покрова (рис. 2 б). В 1998 г. скважина 5Г-1, бурение которой на станции выполняют специалисты СПГИ, впервые вошла на глубину 3539 м

Таблица 1.

Основные морфометрические характеристики озера Восток по данным работ (Попов, Черноглазов, в печати; Попов и др., в печати)

Характеристика	Ед. изм.	Значение
Площадь (с островами)	км ²	15790
Площадь островов	км ²	365
Число островов		11
Площадь (без островов)	км ²	15425
Средняя глубина	м	400
Максимальная глубина	м	1200
Объем воды	км ³	6100
Минимальная мощность ледника над водной поверхностью	м	3600
Максимальная мощность ледника над водной поверхностью	м	4350
Средняя высота дна озера	м над у.м.	–900
Минимальная высота дна озера	м над у.м.	–1600

в слое конжеляционного (озерного) льда, образовавшегося из подледниковой воды. Буровые работы были остановлены, когда скважина достигла отметки 3623 м, и не возобновлялись в течение восьми лет.

В преддверии МПГ, в конце 2005 г. керновое бурение скважины 5Г-1 электромеханическим снарядом было продолжено (Vasiliev et al., 2007). В 2007 г. скважина достигла рекордной глубины 3666,54 м. С момента возобновления буровых работ на поверхность было поднято 44 м керна льда (замершей воды) озера Восток (рис. 3), до контакта ледника с подледниковой водой оставалось пробурить чуть больше 80 м льда.

В октябре 2007 г. в скважине произошла авария, которая закончилась отрывом грузонесущего кабеля от снаряда и потерей снаряда в призабойной зоне

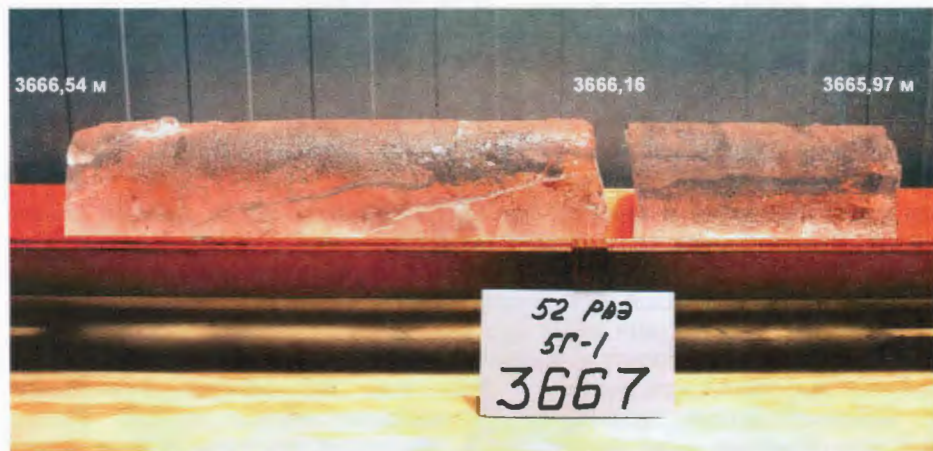


Рис. 3. Керн озерного льда, поднятый из скважины 5Г-1 с глубины 3665,97–3666,54 м в последнем буровом рейсе в этой скважине 7 августа 2007 г.

скважины. Для обхода аварийного снаряда была разработана и впервые в мировой практике применена технология забуривания нового ствола скважины механическим снарядом с заданной глубины из аварийной скважины. Глубина начала и угол отклонения новой скважины были рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить расстояние не менее 1 м между новой скважиной и аварийным снарядом и гарантировать повторное получение керна полного диаметра на глубине залегания слоя, содержащего большое количество крупных минеральных включений донных осадков озера Восток (3606,30–3606,50 м).

В соответствии с этими требованиями забуривание нового ствола скважины 5Г-2 было произведено в интервале глубин 3587,0–3598,6 м. На протяжении 12-метрового участка отклонения из стенки скважины 5Г-1 был получен ледяной керн с постепенно увеличивающимся с глубиной поперечным сечением серповидной формы (рис. 4). Для выполнения отклонения применялся штатный буровой снаряд со специальной буровой коронкой, способной фрезеровать стенку скважины, в том случае если последняя имеет хотя бы незначительный угол с отвесной линией.

Глубина нового ствола глубокой скважины 5Г-2 к концу сезонных работ 55 РАЭ (2009/10 г.) составила 3649,78 м. Маркирующий слой крупных минераль-

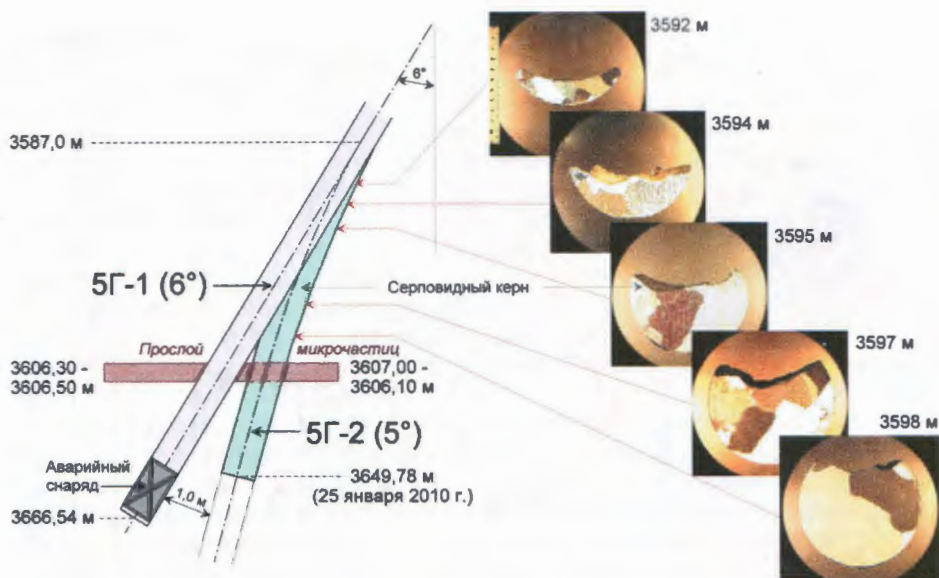


Рис. 4. Схема забуривания нового ствола скважины 5Г-2 из аварийной скважины 5Г-1. Маркирующий слой крупных минеральных включений был встречен в кернах скважин 5Г-1 и 5Г-2 на глубинах 3606,30–3606,50 и 3607,00–3607,10 м соответственно. Справа показаны поперечные сечения (шлифы) ледяных кернов, полученных из стенки аварийной скважины 5Г-1 в интервале глубин 3592–3598 м

ных включений был обнаружен в керне 5Г-2 на глубине 3607,00–3607,10 м. Незначительное различие в глубинах залегания одного и того же слоя в двух параллельных кернах (70 ± 5 см) связано с ошибкой определения глубины начала зарезания нового ствола скважины 5Г-2 по кабельному счетчику буровой установки.

В ходе выполнения буровых работ на станции Восток в период МПГ были созданы условия для нормального продолжения проходки скважины 5Г-2, что дает возможность обоснованно планировать дальнейшие этапы подготовки и осуществления первого проникновения в подледниковое озеро Восток.

4. Происхождение озерного льда

На первом этапе исследования озера Восток – до проникновения в него с целью проведения прямых измерений физических и геохимических характеристик озерной воды – единственным источником экспериментальных данных о гидрологическом режиме этого уникального водоема служат образцы озерного льда, представляющего собой одну из трех сред (лед–вода–донные осадки) подледникового озера. Образование озерного льда, который мы получаем в виде керна из скважины на станции Восток, происходило вдоль линии тока ледника, проходящей через станцию (рис. 5).

Линия тока VFL (*Vostok flow line*) берет свое начало на Ледоразделе В в 370 км к западу от озера (за пределами карты, показанной на рис. 5). На

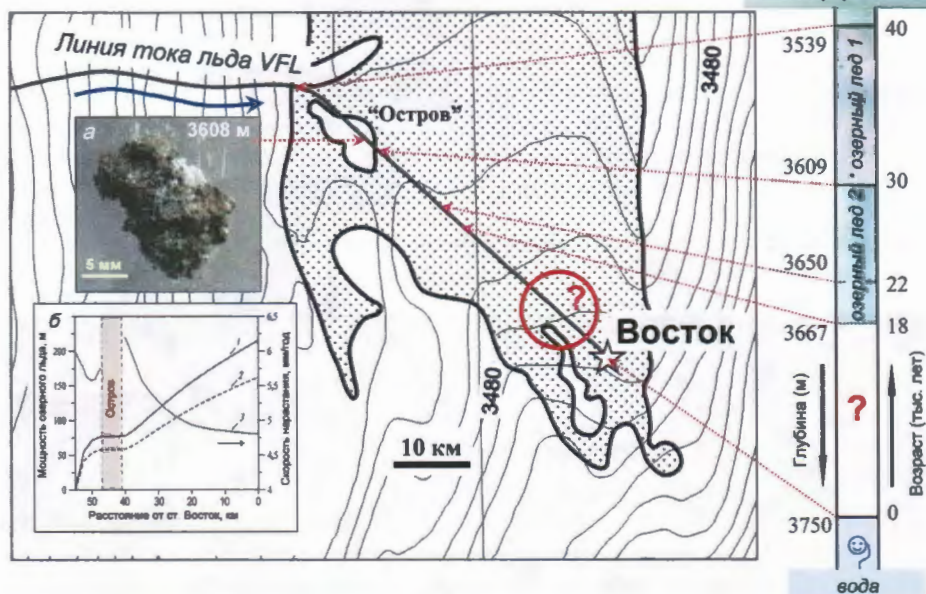


Рис. 5. Происхождение озерного льда, залегающего в основании ледникового покрова в районе станции Восток (адаптированная схема из работы Ekaykin et al., 2010) Береговая линия озера Восток показана по данным ПМГРЭ (Masolov et al., 2006). В правой части рисунка представлен вертикальный разрез толщи озерного льда, вскрытый скважиной, на котором указаны глубины залегания границ между атмосферным и озерным льдом (3539 м), озерным льдом 1 и 2 типа (3609 м), максимальная глубина, достигнутая скважиной 5Г-1 (3667 м), и ожидаемая глубина залегания раздела лед-вода (3750 м). Для каждого горизонта указан возраст и место образования льда на линии тока ледника VFL по модельным данным (Salamatina et al., 2009). На врезках: а – фотография крупного включения донных осадков озера, захваченного озерным льдом, во время прохождения ледника над «островом», расположенным в 40 км вверх по течению льда от станции; б – расчетные характеристики озерного льда вдоль линии тока VFL по Salamatina et al. (2009): 1 – мощность толщи озерного льда в современную эпоху, 2 – минимальная мощность озерного льда в конце межледниковых периодов; 3 – скорость нарастания озерного льда

расстоянии примерно 60 км к северо-западу от станции ледник достигает котловины подледникового озера и вступает в контакт с озерной водой. Сразу после пересечения линии налегания на холодной нижней поверхности ледникового покрова начинает нарастать конгеляционный лед. В керне скважины 5Г-1 граница между ледниковым льдом атмосферного происхождения и конгеляционным льдом, образовавшимся из озерной воды, фиксируется на глубине примерно 3539 м (см. рис. 5). Расчеты, выполненные с помощью математической модели растекания ледникового покрова, учитывающей влияния прошлых изменений климата на скорость движения льда над озером Восток (Salamatina et al., 2009), показали, что перемещение ледника от западного берега озера до станции Восток заняло примерно 40 тыс. лет. В соответствии с этим, возраст конгеляционного льда в районе скважины уменьшается с ростом глубины его залегания от 40 тыс. лет (на контакте с атмосферным льдом) до нуля (на контакте с озерной водой).

Вскоре после выхода на озеро линия тока льда VFL пересекает небольшой остров, отделенный от западного берега озера Восток узким (и, вероятно, мелководным) проливом. Предполагается, что именно в этой части подледникового водоема, над проливом, формируется 70-метровая толща озерного льда 1, содержащего видимые невооруженным глазом минеральные включения донных осадков озера (*Bell et al., 2002*). В 40–45 км от станции движущийся ледник выходит на открытую, глубоководную часть озера, над которой продолжается медленное нарастание чистого льда, не содержащего минеральных включений (озерный лед 2). Таким образом, изменение свойств ледяного керна в интервале глубин 3539–3667 м отражает пространственную (вдоль линии тока льда) и временную (за последние 40–18 тыс. лет) изменчивость условий конгеляционного льдообразования при движении ледника через озеро (см. рис. 5).

Анализ результатов исследований керна показал, что озерный лед 1, содержащий включения донных осадков озера (интервал глубин 3539–3609 м), весьма неоднороден по количеству и размеру минеральных включений и так называемых водных карманов – замерзших включений озерной воды, представляющих собой центры сосредоточения газовых, химических и биологических примесей, захваченных в ходе образования льда. В частности, в пределах толщи озерного льда 1 выделяются два слоя 3548–3553 м и 3606–3608 м с повышенной концентрацией наиболее крупных включений донных осадков озера Восток (рис. 6). Уникален по обилию и крупности минеральных включений для всего разреза ледникового льда 1 тонкий 20-см маркирующий слой, соответствующий в керна скважины 5Г-1 интервалу глубин 3606,30–3606,50 м. В этом слое обнаружено сразу пять минеральных агрегатов размером 4–5,5 мм, каждый из которых содержит включения, по внешнему виду напоминающие газовые гидраты.

Отсутствие корреляции между концентрацией водных карманов и включений донных осадков озера (см. рис. 6) свидетельствует о слабой зависимости процесса захвата минеральных агрегатов от условий образования озерного льда 1. Логично предположить, что количество и размер минеральных включений во льду увеличиваются по мере приближения нижней поверхности ледника ко дну озера, в то время как количество и размер замерзших водных включений служат индикаторами скорости нарастания конгеляционного льда: чем больше крупных водных карманов в керна, тем выше была скорость роста льда. Таким образом, слой с повышенным содержанием крупных минеральных включений (3548–3553 и 3606–3608 м), которые, в целом, характеризуются пониженной концентрацией водных карманов, должны соответствовать слоям льда, сформировавшимся вблизи линии налегания или непосредственно на контакте ледника с подстилающими горными породами. Наличие крупных обломков горных пород (до 4 мм в поперечнике) в минеральных агрегатах в слое 3606–3608 м (*Лейченко и др., 2005; Leitchenkov et al., 2007*) указывает на то, что они были захвачены льдом в процессе экзарации ледником поверхности подледникового острова, лежащего в 40 км вверх по линии тока льда от скважины. Следовательно, первоначальная структура нижних слоев конгеляционного льда, образовавшихся до пересечения ледником острова, могла претерпеть существенные изменения в результате взаимодействия движущегося ледника с ложем.

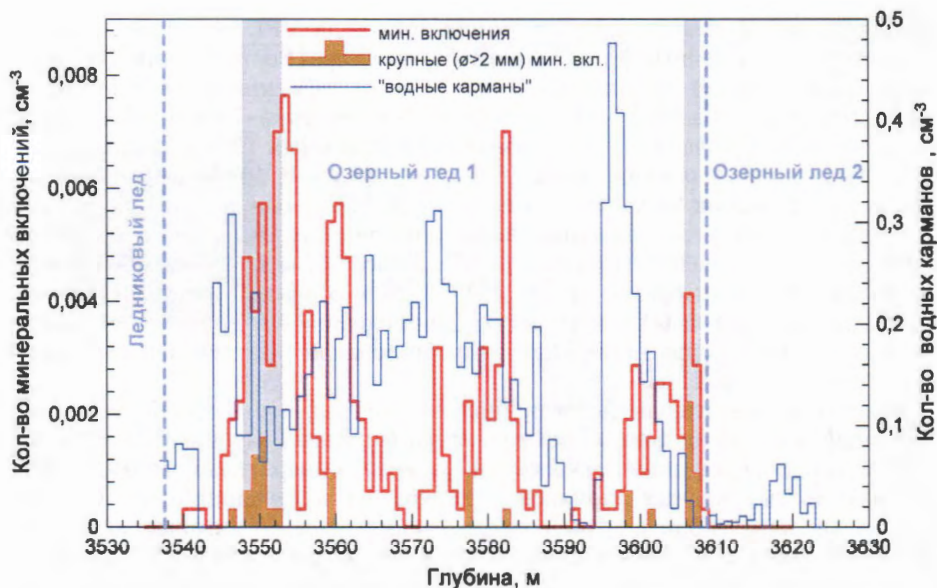


Рис. 6. Количество минеральных включений и водных карманов в керне озерного льда из скважины 5Г-1. Затухеванные зоны показывают интервалы керна (3548–3553 м, 3606–3608 м) с повышенной концентрацией крупных включений донных осадков озера Восток

5. Минералогические и изотопные исследования включений донных осадков в кернах озерного льда

Приведенная в разделе 2 оценка мощности осадочного чехла озера Восток, по-видимому, характеризует суммарную мощность консолидированных (древних) и рыхлых (более молодых) осадков на дне озера. Мощность последних, скорее всего, незначительна по сравнению с мощностью древних осадочных пород, но именно включения молодых озерных отложений с большей степенью вероятности могли быть захвачены образующимся на нижней поверхности ледника озерным льдом и попасть в ледяной керн, добываемый из скважины на станции Восток. Исследования, проведенные специалистами ВНИИОкеангеология, позволили установить, что минеральные включения в озерном льду 1 содержат обломки литифицированных осадочных пород величиной 0,5–4,5 мм (рис. 7), свидетельствующих о наличии на западном побережье озера Восток относительно древних (палеозойско-мезозойских) комплексов Восточно-Антарктической платформы. Установлено, что обломки имеют различный минеральный состав и представлены аркозовыми песчаниками, кварц-хлорит-сланцевыми и полевошпат-хлоритовыми алевролитами. Встречаются обломки на 90% сложенные апатитом. Основными акцессорными минералами являются: магнетит, рутил, ильменит, продукты выветривания оксидов титана и железа, апатит, циркон, ксенотим и монацит.

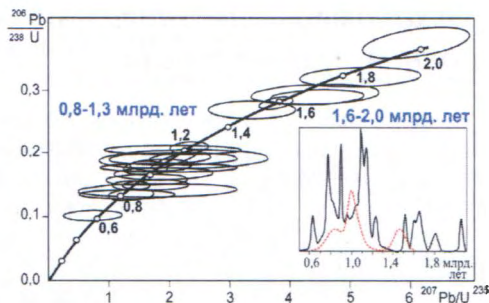
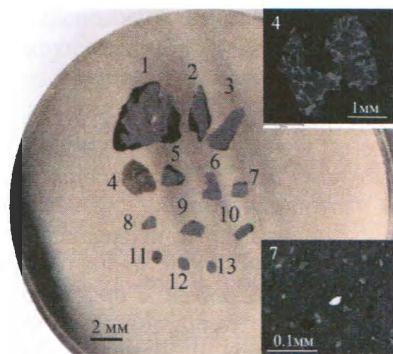


Рис. 7 (слева). Фотография шлифа с обломками горных пород из крупного осадочного включения в ледяном керне с глубины 3608 м. На врезках показаны микрофотографии обломков 4 и 7 в отраженных электронах. В обломке 4 преобладает кварц (серые зерна), а обломок 7 преимущественно сложен плагиоклазом и слоистыми силикатами; белое зерно – циркон.

Рис. 8 (справа). Уран-свинцовая изотопная диаграмма с конкордией и график (врезка) относительной вероятности распределения возрастов цирконов (черная сплошная линия, 23 определения) и монацитов (красная пунктирная линия, 5 определений) в минеральных включениях, обнаруженных в ледяном керне со станции Восток (Leitchenkov et al., 2007).

В обнаруженных урансодержащих минералах на вторично-ионном микронзонде высокого разрешения SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) были изучены соотношения изотопов урана и свинца. Полученные изотопные датировки детритовых минералов позволили выделить две преимущественные группы возрастов в интервале 0,8–1,3 и 1,6–2,0 млрд. лет (рис. 8), которые свидетельствуют о распространении вещественных комплексов соответствующего возраста в коренном ложе Центральной Антарктиды (район гор Гамбурцева), откуда, как предполагается, происходил снос детритовых цирконов и монацитов, выявленных в составе обломков пород захваченных озерным льдом (Leitchenkov et al., 2007).

Важным результатом исследований стало обнаружение в одном из осадочных включений с глубины 3559 м мелких (5–10 мкм) кристаллов сульфидных минералов: молибденита, сфалерита и двух зерен пирита, одно из которых почти полностью замещено окислом железа (Лейченко и др., 2005). Все эти минералы являются продуктами гидротермальной деятельности, и встречаются как в метаморфических породах, так и в современных осадках (например, в рифтовых зонах океана или в активных рифтовых зонах континентов), а, следовательно, могли оказаться в донных отложениях либо за счет экзарации коренного основания, либо в результате эндогенных процессов, т.е. за счет поступления флюидов (горячих растворов, насыщенных газами) из глубинных слоев земной коры озера Восток. В пользу местного происхождения сульфидов свидетельствует хорошо сохранившаяся первичная (кубическая) огранка кристалла замещенного пирита (Лейченко и др., 2005). Гидротермальная активность в озере Восток может быть связана с подъемом горячих пластовых вод по глубинным разломам, ограничивающим рифтовый грабен, в результате незначительных по амплитуде подвижек блоков фундамента (см. раздел 2).

6. Закономерности эволюции строения озерного льда

К числу свойств озерного льда, которые потенциально могут быть генетическими признаками, несущими информацию об условиях его образования и гидрологическом режиме подледникового водоема, в первую очередь, относятся строение льда, его газосодержание и изотопный состав.

К настоящему времени полностью завершены непрерывные исследования структуры и строения озерного льда по всей длине колонки керна скважины 5Г-1 до глубины 3667 м (Екайкин и др., 2009; Липенков и др., 2010). Исследования проводились в тонких пластинах льда толщиной 3–5 мм, вырезанных вдоль оси керна, и в изготовленных из этих пластин шлифах толщиной 0,2–0,4 мм. Они включали: непрерывное картирование границ сечений кристаллических индивидов и измерение ориентировки их главных кристаллографических осей (с-осей).

Анализ результатов петрографических исследований керна показал, что в пределах слоев озерного льда 1 и 2 наблюдаются увеличение среднего размера зерен и развитие субгоризонтальной ориентировки их с-осей по мере увеличения глубины залегания (уменьшения возраста) льда (рис. 9). Указанные

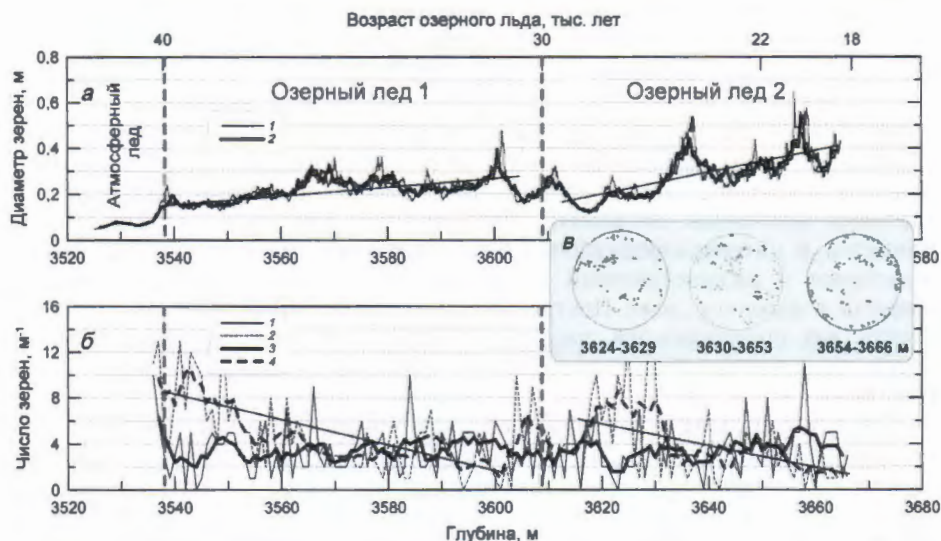


Рис. 9. Изменение размера а и ориентировки б, в ледяных кристаллах по глубине в слоях озерного льда 1 и 2 по данным В.Я. Липенкова с соавторами (2010): а – сглаженные профили среднего диаметра кристаллов: 1 – скользящее среднее по 3 м; 2 – скользящее среднее по 5 м; б – изменение по глубине числа сечений кристаллов на 1 м длины керна, с-оси которых лежат под углом 0–10° к горизонтальной плоскости (1 – результаты измерений, 3 – скользящее среднее по 3 м) и 45–55° (2 – результаты измерений, 4 – скользящее среднее по 3 м). Прямыми линиями на рисунках а и б показаны тренды, характеризующие развитие закономерного строения конгломерационного льда (рост кристаллов и появление преимущественной субгоризонтальной ориентировки с-осей) в слоях озерного льда 1 и 2; в – диаграммы ориентировки с-осей кристаллических индивидов в указанных интервалах глубин

тенденции отчетливо прослеживаются на протяжении каждого из слоев, но нарушаются (прерываются) в пограничной зоне между ними, которая соответствует интервалу глубин 3606–3608 м с повышенным содержанием крупных минеральных включений.

Таким образом, как в слое озерного льда 1, так и в слое озерного льда 2 эволюция строения ледяной породы по глубине отвечает классическому закону геометрического отбора, в соответствии с которым преимущественное развитие в процессе стесненного (ортотропного) роста получают кристаллические индивиды, ориентированные своими *a*-осями (т.е. направлениями максимальной скорости роста) перпендикулярно фронту кристаллизации. Представленные на рис. 9 структурные данные подтверждают высказанное выше предположение о том, что между образованием слоев озерного льда 1 и 2 существовал перерыв, связанный с прохождением ледника через остров. Над островом нарастания водного льда не происходило, а закономерное строение нижних слоев озерного льда, сформировавшихся выше по течению ледника (в проливе), существенно нарушилось в результате деформации этих слоев при взаимодействии ледника с подстилающей горной породой. Ниже по течению льда от острова процесс геометрического отбора растущих из воды ледяных кристаллов возобновился, но уже на ледяном основании с видоизмененной структурой.

Развитие субгоризонтальной ориентировки *c*-осей кристаллов конжеляционного льда на стадии их ортотропного роста из пресной воды может реализовываться только в случае наличия переохлажденной воды у фронта кристаллизации (Шумский, 1955; Черепанов, 1968; Голубев, 2003). Таким образом, установленные тенденции эволюции строения льда, нарастающего на подошву ледника вдоль линии тока VFL (см. рис. 5), свидетельствуют о возможности поступления переохлажденной воды из северных районов озера Восток в места образования озерного льда 1 (пролив между островом и западным берегом озера) и озерного льда 2 (глубоководная часть озера между островом и станцией Восток).

7. Газовый режим озера

Исследование газового режима подледникового озера – необходимая составная часть изучения его как экосистемы. Газовый состав озерной воды является тем параметром системы, который определяет и одновременно отражает видовое разнообразие подледниковой микробиоты, создает условия, способствующие или препятствующие развитию жизни подо льдом.

Принципиальная схема источников и стоков газов в подледниковом озере приведена на рис. 10, *а*. Основными процессами, контролирующими газовый режим озера Восток, служат: 1) поступление атмосферных газов через ледник в результате таяния ледникового льда в северной части озера и 2) аккумуляция атмосферных газов в озере за счет образования (в южной части озера) и выноса за пределы озерной котловины конжеляционного льда, концентрация газов в котором на два–три порядка ниже, чем в тающем ледниковом льду. Остальные составляющие газового баланса озера (поступление газов со дна озера, поглощение и выделение газов, связанное с биогеохимическими реакциями), по-видимому, играют второстепенную роль. Таким образом, газовый состав озерной воды в основном определяется бюджетом атмосферных газов

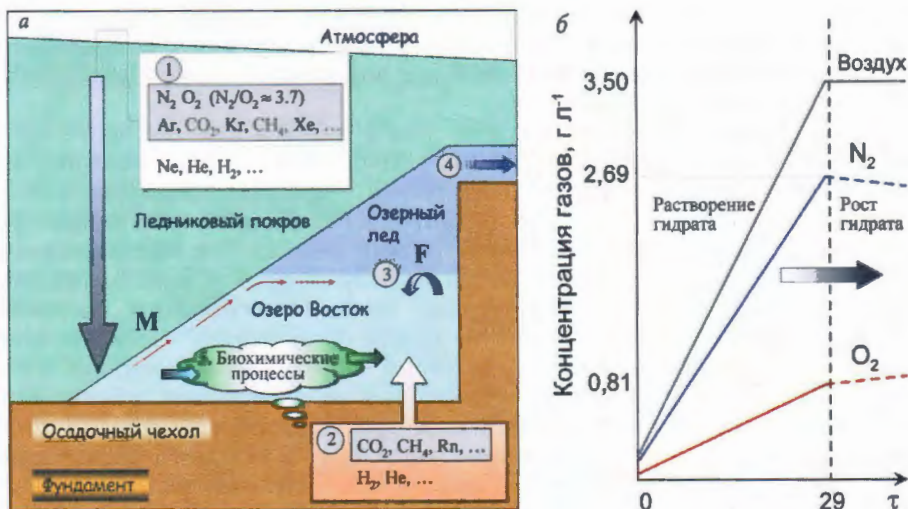


Рис. 10. Аккумуляция газов в подледниковом озере Восток (адаптированные иллюстрации из работы Липенков и др., 2003):

а – схема основных источников и стоков газов в подледниковом озере: 1 – поступление атмосферных газов в области донного таяния ледникового льда (М); 2 – поступление газов с гидротермальными водами по разломам земной коры (гидратообразующие газы из источников 1 и 2 обведены рамками); 3 – рост концентрации растворенных в озере газов в результате кристаллизации воды в области нарастания конжеляционного льда (F); 4 – вынос конжеляционного льда и содержащихся в нем (в незначительном количестве) газов за пределы озера; 5 – потребление и выделение газов в результате биогеохимических реакций в осадках и в водном слое. б – расчетные кривые изменения концентрации газов в озерной воде в зависимости от числа циклов (τ) полного водообмена озера

N₂ и O₂. Объем воздуха, ежегодно «закачиваемого» в озеро из атмосферы, оценивается в 1,8–3,5 10⁶ м³ (уточненная оценка по данным работы Липенков и др., 2003).

Большинство газов, потенциально участвующих в формировании газового режима озера Восток, являются гидратообразующими (см. рис. 10 а). Последнее означает, что при соответствующих парциальных давлениях эти газы могут образовывать с водой газовый гидрат – нестехиометрическое соединение клатратного типа, смешанный состав которого будет определять равновесную с ним концентрацию газов, растворенных в озерной воде.

Рост содержания основных газов (N₂ и O₂) в воде озера до достижения состояния равновесия с гидратной фазой описывается уравнением (Липенков и др., 2003):

$$C_L = C_{MI} (1 + t/t_R), \quad (1)$$

в котором C_L – общее содержание газов в озерной воде; C_{MI} – общее содержание газа в тающем ледниковом льде ($C_{MI} \approx 0,090$ см³г⁻¹), t – время, а t_R – период времени, за который происходит полное обновление воды в озере.

До момента начала гидратообразования в озере, общее газосодержание озерной воды равно сумме концентраций растворенных азота и кислорода при соотношении N₂/O₂ = 3,7 (как в атмосферном воздухе). В соответствии с законами

фракционирования двухкомпонентной газовой смеси, участвующей в образовании гидратной фазы, первые гидраты, которые будут образовываться в озере, должны быть обогащены азотом. Следовательно, дальнейшее увеличение массы газового гидрата в процессе непрерывной аккумуляции газов в озере будет приводить к постепенному обеднению жидкой фазы азотом, увеличению концентрации растворенного кислорода и сдвигу состава гидратной фазы в сторону меньших значений N_2/O_2 . Эволюция газового состава озерной воды по этому сценарию отображена на рис. 10 б, на котором время выражено числом циклов полного обновления воды в озере $\tau = t/t_R$. На графике видно, что число циклов τ_F необходимых для достижения состояния газового равновесия в озере, равно 29.

Беря во внимание существующие оценки периода полного водообмена (5–100 тыс. лет) и возраста озера (порядка 15 млн лет), можно заключить, что вероятность достижения газового равновесия в озере весьма велика (Lipenkov, Istomin, 2001; McKay et al., 2003). В этом случае концентрация растворенного в воде озера Восток кислорода (порядка 0,8 г/литр) примерно в 30 раз превышает его концентрацию в перенасыщенных воздухом поверхностных антарктических озерах с многолетним ледяным покровом (Wharton et al., 1986). Такая среда является уникальной в биологическом плане (Bulat et al., 2003). Она может оказать серьезное сдерживающее влияние на развитие жизни в озере и потребует специальной адаптации обитающих здесь микроорганизмов.

В соответствии с новыми оценками растворимости атмосферных газов во льду (Ikeda-Fukazawa et al., 2005), газосодержание озерного льда, находящегося в равновесии с предельно насыщенной растворенными газами подледниковой водой, должно составлять $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$. Экспериментальные данные об общем содержании газа (V) в керне озерного льда, полученные в период МПГ, показывают, что толща озерного льда 1 (3538–3609 м) характеризуется повышенным и чрезвычайно изменчивым газосодержанием, которое в основном определяется концентрацией во льду замерзших жидких включений. Об этом свидетельствует сопоставление результатов измерения V с количеством водных карманов в образцах льда, использованных для газовых анализов (рис. 11).

В озерном льду 2 счетная концентрация карманов на порядок ниже, чем в вышележащем слое, и, следовательно, значения V должны быть близки к уровню растворимости газов во льду, находящемся в равновесии с озерной водой. Как видно из рис. 11, теоретический уровень W-H-I, соответствующий газосодержанию $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$, которое должно быть характерно для льда в равновесии с озерной водой, насыщенной атмосферными газами в присутствии гидрата воздуха, практически совпадает со средним уровнем измеренных значений V в озерном льду 2 (см. рис. 11).

Заметим, что уровень W-H-I соответствует нижней границе газосодержания озерного льда при максимальной концентрации растворенных газов в озере и отвечает случаю бесконечно малой скорости роста кристаллов льда, исключая образование жидких включений и механический захват растворенного в воде газа. Принимая во внимание ненулевую концентрацию водных карманов в озерном льду 2, можно сделать вывод о том, что верхний слой озерной воды, из которого образовывался этот лед, хотя и близок к насыщению газами, но еще не достиг его. Последнее, в свою очередь, может свидетельствовать либо о плохом перемешивании талой воды, поступающей в область образования озерного льда из северных районов озера, либо о нестационарном состоянии системы ледник–озеро в целом.

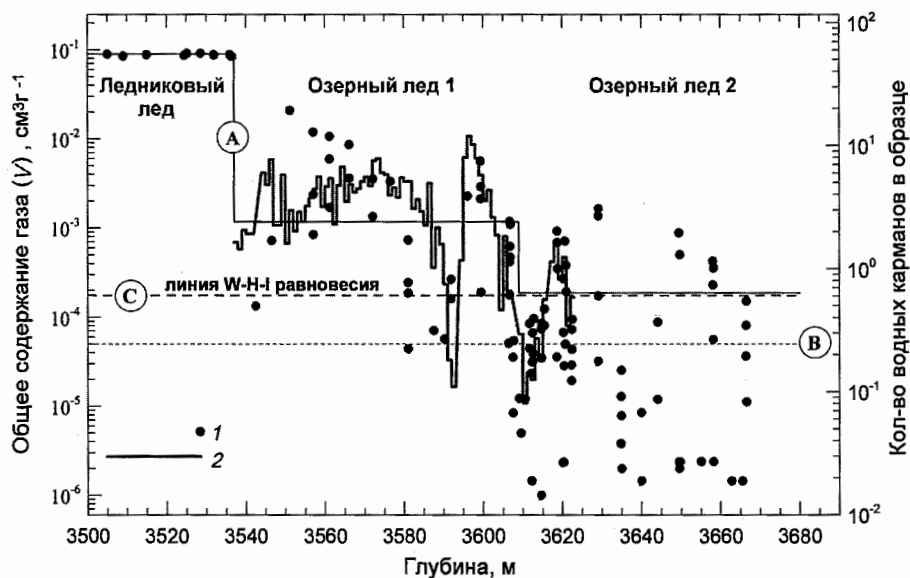


Рис. 11. Газосодержание озерного льда и количество водных карманов в измеренных образцах: 1 – результаты измерения газосодержания льда (V); 2 – количество водных карманов в образцах льда, использованных для измерения V (рассчитывалось по данным об объеме образцов и результатам определения счетной концентрации карманов, представленным на рис. 6). Ступенчатая линия (A) показывает средние уровни газосодержания в толщах ледникового льда, озерного льда 1 и озерного льда 2; (B) – уровень чувствительности прибора; (C) – расчетное значение газосодержания льда в равновесии с озерной водой, насыщенными атмосферными газами в присутствии гидрата воздуха (линия равновесия W-H-I). При построении графика использовались данные работы (Липенков и др., 2010); газосодержание льда (C), соответствующее равновесию вода–гидрат–лед (W-H-I), было рассчитано с учетом новых оценок растворимости газов во льду (Ikeda-Fukazawa et al., 2005)

8. Изотопный режим озера Восток

На границе ледникового льда атмосферного происхождения и конгеляционного льда, образовавшегося из воды подледникового озера, наблюдаются резкие изменения изотопных характеристик ледяного керна: существенно уменьшается изменчивость изотопного состава льда по глубине, коэффициент наклона линии регрессии $\delta D(\delta^{18}O)$ уменьшается с 8 до 4, а дейтериевый эксцесс ($dxs = \delta D - 8\delta^{18}O$) – с 14 ‰ (значение, характерное для атмосферного льда) до 7 ‰. Последнее может быть связано с поступлением в озеро гидротермальных вод, обогащенных кислородом-18.

Возобновление бурения глубокой скважины на станции Восток и исследования нового керна, полученного в период МПГ, позволили продлить непрерывный профиль изотопного состава озерного льда до глубины 3650 м и более подробно изучить изменчивость изотопных характеристик озерного льда 2, залегающего глубже 3609 м (Екайкин и др., 2005; Ekaikin et al., 2010).

Факторы, оказывающие влияние на изотопный состав формирующегося озерного льда, могут быть разделены на две группы. К первой относятся условия на

контакте ледник–озеро, определяющие механизм образования конжеляционного льда и значения эффективных коэффициентов фракционирования, ко второй – факторы, определяющие изотопный состав озерной воды, из которой образуется лед, а именно: изотопный состав и количество вод, поступающих в озеро в результате донного таяния льда и гидротермальной деятельности на дне озера, сток воды из озера (в виде озерного льда или жидкой воды), а также степень перемешивания поступающей в озеро воды с резидентной водой озера.

Чтобы различить вариации изотопного состава озерного льда, связанные с физическими условиями льдообразования и с колебаниями изотопного состава самой озерной воды, была введена новая функция дейтериевого эксцесса $dxs4$, соответствующая типичному для конжеляционного льда наклону линии регрессии $\delta D(\delta^{18}O)$ (Ekaykin et al., 2010):

$$dxs4 = \delta D - 4,06 \delta^{18}O. \quad (2)$$

Значение $dxs4$ для озерного льда близко к значению этого параметра для озерной воды и практически не зависит от коэффициентов фракционирования и условий конжеляционного льдообразования.

На профилях изотопных характеристик озерного льда, показанных на рис. 12, можно выделить 4 интервала глубин, отличающихся по характеру изменений изотопного состава льда по глубине.

Первый интервал, 3539–3557 м, характеризуется быстрым ростом содержания тяжелых изотопов во льду глубже отметки 3547 м, на которой наблюдаются минимальные для всего изученного разреза значения δD и $\delta^{18}O$. Низкое содержание тяжелых изотопов в районе 3547 м можно объяснить быстрым ростом кристаллов внутриводного льда в условиях переохлаждения воды на контакте с холодным ледником (Salamatin et al., 2009). Характер и амплитуда вариаций $dxs4$ в указанном интервале глубин свидетельствует об увеличении содержания тяжелых изотопов в воде, из которой образовывался лед.

Второй интервал, 3557–3617,5 м, характеризуется значимыми периодическими изменениями содержания кислорода-18 и незначительными (по сравнению с экспериментальной погрешностью) вариациями δD , что не дает возможности уверенно идентифицировать причины указанных вариаций $\delta^{18}O$. Вместе с тем, существенные изменения $dxs4$ в пределах данного интервала указывают на возможное изменение изотопного состава воды озера.

Третий интервал глубин, 3617,5–3633,0 м, характеризуется слабой изменчивостью обоих изотопов и может рассматриваться как переходная зона от второго к четвертому интервалу.

Наконец, четвертый интервал керна, 3633–3650 м, резко отличается по своим изотопным свойствам от вышележащей части разреза озерного льда. Содержание кислорода-18 по-прежнему мало меняется с глубиной, в то время как профиль дейтерия показывает скачкообразное и весьма значительное (на 0,7 ‰) увеличение δD между 3633 и 3635 м. Коэффициенты корреляции и наклона линии регрессии $\delta D(\delta^{18}O)$ статистически незначимы в пределах этого интервала, что указывает на несогласованное изменение обоих изотопов по глубине. Ход изменений $dxs4$ в ледяном керне в этом случае полностью определяется ходом δD . Столь отчетливое отсутствие корреляции между δD и $\delta^{18}O$ может быть вызвано только несогласованным изменением содержания тяжелых изотопов в озерной воде вследствие неравновесного, в отношении дейтерия, состояния системы озеро–подстилающие породы и изменения интенсивности поступления гидротермальных вод в озеро.

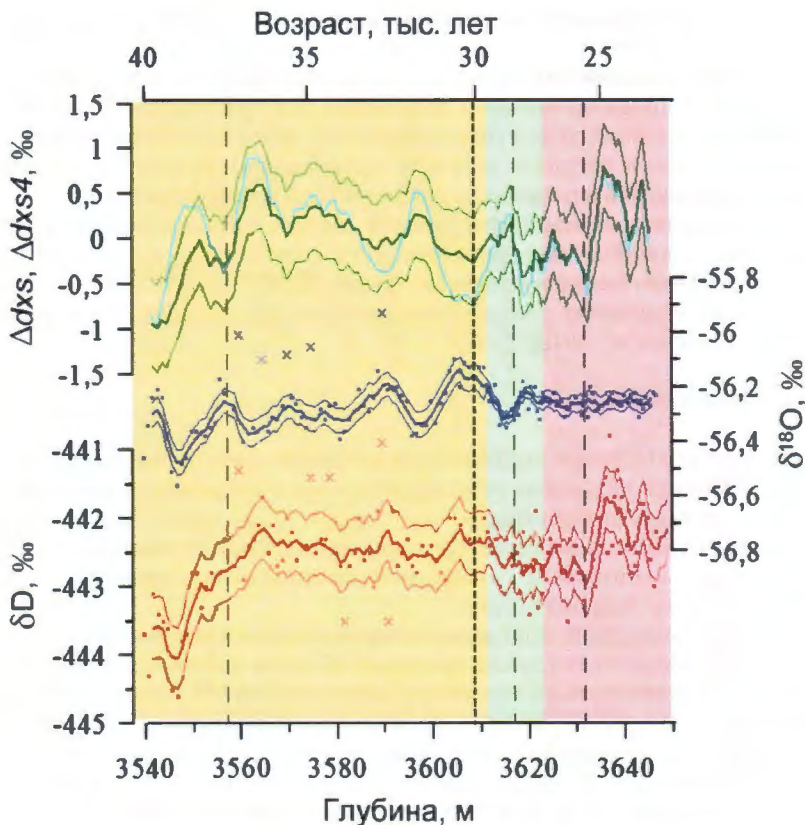


Рис. 12. Профили изотопных характеристик озерного льда (δD , $\delta^{18}O$, d_{xs} и d_{xs4}) в интервале глубин 3539–3650 м керна станции Восток по данным Ekaykin et al. (2010). Точками показаны значения изотопного состава отдельных образцов, крестиками – отбракованные значения. Жирные кривые – скользящие средние значения по 5 точкам; тонкие кривые ограничивают область погрешности (2 σ). В верхней части рисунка показаны ряды аномалий Δd_{xs} (голубая линия) и Δd_{xs4} (жирная зеленая линия – скользящее среднее, тонкие зеленые линии – пределы погрешности), представляющие отклонения соответствующих характеристик от их средних значений для изученной толщи озерного льда. Вертикальные пунктиры – границы однородных – по характеру изменчивости изотопного состава – слоев озерного льда (см. текст); жирный пунктир – граница между толщами озерного льда 1 и 2 (3609 м). Заливкой выделены интервалы керна, исследования которых проводились в разных лабораториях и/или в разное время

Поскольку типичный период вариаций изотопного состава льда 1 составляет 10^3 лет, т.е. на порядок меньше периода полного водообмена озера, указанные особенности вариаций изотопных характеристик льда свидетельствуют о недостаточно эффективном перемешивании талой воды с резидентной озерной водой на пути к району льдообразования (см. раздел 7).

Для интерпретации результатов измерения изотопного состава озерного льда использовалась изотопная модель озера Восток, разработанная в ААНИИ (Ekaykin et al., 2010):

$$\frac{dM_l}{dt} = M_{melt} (1 - q), \quad (3)$$

и

$$\frac{d(M_l R_l)}{dt} = M_{melt} (R_{melt} - q\alpha [R_{melt} (1 - \sigma) + R_l \sigma] + q_{ht} [R_{ht} - R_l]) \quad (4)$$

Здесь M_l – масса воды в озере, M_{melt} – масса талой воды, ежегодно поступающей в озеро; q – отношение расходной части водного баланса (массы конжеляционного льда, ежегодно образующегося в южной части озера) к его приходной части (потоку талой воды M_{melt} в северной части озера); α – эффективный коэффициент изотопного фракционирования при образовании конжеляционного льда; R – изотопный состав, соответственно, талой озерной воды ($_{melt}$), резидентной озерной воды ($_l$) и гидротермальных источников ($_{ht}$); σ – коэффициент смешивания (от 0 до 1) талой ледниковой и резидентной воды; q_{ht} – отношение ежегодного прихода гидротермальных вод, M_{ht} , к приходу талой воды, M_{melt} . Отметим, что модель, схематически представленная на рис. 13, допускает возможность как нестационарного состояния озера, так и неполного смешивания талой ледниковой и гидротермальных вод с резидентной водой озера по пути к месту замерзания. В модели предполагается, что гидротермы питаются инфильтрационной водой, поступающей из самого озера Восток. В этом случае подземные воды не оказывают влияния на баланс массы озера, но меняют его изотопный состав.



Рис. 13. Полутораслойная схема циркуляции воды и изотопного баланса озера Восток, предложенная в работе Ekaikin et al. (2010) (см. пояснения в тексте)

Тщательный анализ данных по изотопному составу кернов озерного и ледникового льда со станции Восток, а также кернов, полученных на станциях Купол В и Купол С, который был выполнен с использованием модели (3)–(4), позволил уточнить изотопный состав основных (известных) составляющих водного баланса озера. В соответствии с данными работы (Ekaykin et al., 2010), изотопный состав талых ледниковых вод (R_{melt}) характеризуется значениями $-445,2 \pm 2,9 \%$ для δD и $-57,25 \pm 0,36 \%$ для $\delta^{18}O$ и, следовательно, существенно отличается от среднего изотопного состава озерного льда ($-442,6 \%$ для δD и $-56,28 \%$ для $\delta^{18}O$) по содержанию кислорода-18, при статистически незначимом различии в содержании дейтерия. Указанная особенность подтверждает существование в озере дополнительного, гидротермального источника воды. Наиболее вероятный изотопный состав гидротермальных вод (R_{ht}) соответствует значениям $-430,5 \%$ для δD и $-50,9 \%$ для $\delta^{18}O$ (при $q_{ht} = 0,14$), а изотопный состав озерной воды (R_l), из которой образуется конжеляционный лед озера Восток, составляет -449% для δD и $-57,9 \%$ для $\delta^{18}O$ (Ekaykin et al., 2010).

На основании полученных изотопных характеристик составляющих водного баланса озера, его морфометрических параметров (см. раздел 2), модельных данных о скоростях нарастания озерного льда (Salamatina et al., 2009) и исходя из предположения о стационарном состоянии озера, была оценена масса воды, ежегодно поступающей в озеро за счет таяния ледникового льда ($2,0\text{--}3,9 \times 10^7$ т) и из гидротермальных источников ($0,3\text{--}0,6$ т) (Ekaykin et al., 2010).

9. Биологические исследования толщи ледникового покрова над озером

В период МПГ были продолжены биологические исследования образцов снега и льда со станции Восток, включая вновь полученный керн озерного льда. Параллельно с этим продолжалось совершенствование методов и технологий деконтаминации проб, отбираемых для биологических анализов.

Специалистами ПИЯФ РАН была проведена большая работа по точной оценке концентрации микробных клеток в различных слоях ледниковой толщи над озером Восток, от поверхностного снега до самых глубоких горизонтов озерного льда 2 (Булат и др., 2009). Образцы льда и 10-килограммовые образцы снега, отложенного до момента основания станции Восток, отбирались в специальных разовых стерильных костюмах с использованием стерильного оборудования с тем, чтобы минимизировать риск прямого биологического загрязнения (рис. 14). Эти образцы затем обрабатывались с использованием новейших методов деконтаминации льда (Bulat et al., 2004; Булат и др., 2007; Alekhina et al., 2007) и концентрировались в 3000–10 000 раз. Для выявления и подсчета микробных клеток использовали как прямые методы флуоресцентной, лазерной конфокальной и сканирующей микроскопии, так и проточную цитофлуорометрию. Методы микроскопии не дали положительного результата (клетки не были обнаружены). Только метод проточной цитофлуорометрии позволил определить чрезвычайно малое количество клеток, характерное для изученных образцов снега и льда. Полученные концентрации клеток (табл. 2) совпали по уровню значений с последними данными американских ученых (Eha et al., 2008), но оказались на 2–3 порядка ниже опубликованных ранее результатов (Priscu et al., 1999; Karl et al., 1999).



Рис. 14. Сбор образцов снега для биологических исследований с «безжизненной» поверхности Антарктического ледникового покрова над озером Восток (январь 2008 г., 3 км к юго-западу от станции Восток)

Таблица 2. Концентрации микробных клеток в образцах снега и льда со станции Восток (Булат и др., 2009)

Тип образца	Глубина, м	Концентрация клеток, мл ⁻¹
Поверхностный снег	4,3	0,02
	4,3	0
Атмосферный лед	122	1,9
	2005	2,4
	2054	3–24
	3489	0
Озерный лед 1	3561	4–9
	3608	0–19
Озерный лед 2	3613	3
	3621	2
	3622	0,6
	3635	4,7
	3650	3,1
	3659	12

Предельно низкие концентрации микробных клеток в современном снеге и ледниковом льду атмосферного происхождения (см. табл. 2) свидетельствуют о том, что перекрывающий озеро Антарктический ледниковый щит следует рассматривать не как конвейер, инокулирующий озеро находящимися в анабиозе микроорганизмами, а скорее как барьер, который на протяжении миллионов лет препятствовал контакту возможной озерной биоты с поверхностью (Булат и др., 2009).

Низкая концентрация клеток в озерном льду, в свою очередь, может косвенно свидетельствовать о том, что водная толща озера Восток (по крайней мере, ее поверхностный слой) также характеризуется очень бедным микробным сообществом. Результаты подсчета микробных клеток подтверждаются данными ДНК анализа, которые показывают, что озерный лед в целом является исключительно чистым материалом, не содержащим ни бактериальную, ни археобактеральную ДНК. Только несколько бактериальных фило типов были вскрыты в образцах озерного льда 1, содержащих включения донных осадков озера.

Основываясь на существующих представлениях об условиях, характерных для подледникового озера Восток (ультраолиготрофная среда, перенасыщенная кислородом, высокое давление, низкая температура), был определен тип микроорганизмов, которые потенциально могут существовать в воде озера – оксигенофильные хемоавтотрофные пьезофильные психрофилы (Булат и др., 2007). Бактерии такого рода в озерном льду не были обнаружены и науке пока не известны. Единственной надежной находкой в озерном льду 1, которая была подтверждена исследованиями двух независимых лабораторий, до сих пор остается термофильная хемоавтотрофная бактерия *Hydrogenophilus thermoluteolus*, по-видимому занесенная в озеро гидротермальными (пластовыми) водами и захваченная льдом вместе с включениями донных осадков озера (Bulat et al., 2004; Lavire et al., 2006).

10. Оценка стабильности системы ледник – подледниковое озеро Восток

Накопленные к настоящему времени данные позволяют провести предварительное исследование степени стабильности системы ледник – подледниковое озеро Восток. Актуальность такого исследования связана с недавно зарегистрированными быстрыми изменениями высоты поверхности ледникового покрова в различных районах Антарктиды, предположительно вызванными перераспределением значительных масс воды между подледниковыми водоемами (Wingham et al., 2006; Fricker et al., 2007). Эти наблюдения породили представление о существовании под ледниковым щитом Антарктиды обширной гидрологической сети, образованной системой «озер» и «болот», соединяющихся между собой «реками» и «каналами» (Siebert et al., 2007). В том случае, если озеро Восток является активным элементом этой системы, многие из сложившихся к настоящему времени представлений о массовом, изотопном, химическом и газовом балансе озера и его экологической обстановке могут не соответствовать реальности и нуждаются в пересмотре.

Как было показано в работе (Ekaykin et al., 2010), различие между изотопным составом талой воды и озерного льда (около 1 ‰ по содержанию кислорода-18) может быть удовлетворительно объяснено наличием дополнительного (гидро-

термального) источника воды, существование которого подтверждается целым рядом независимых биологических (Bulat et al., 2004; Lavire et al., 2006), минералогических (Лейченко и др., 2005), геохимических (de Angelis et al., 2004), изотопных (Jean-Baptiste et al., 2001) и сейсмологических (Исанина и др., 2009) данных.

В случае выхода системы из стационарного состояния, изотопный состав озерного льда стремится, с течением времени, сравняться с изотопным составом талой воды, чтобы восстановить равновесие. При этом во временном ряду изотопного состава льда должен наблюдаться отрицательный тренд с коэффициентом регрессии $\delta D(\delta^{18}O)$ равным 4. Исследованный к настоящему времени интервал керна охватывает примерно 20-тысячелетний период формирования озерного льда (см. рис. 12), что по порядку величины сопоставимо с периодом полного водообмена озера (10^4 – 10^5 лет). Таким образом, в интервале глубин 3538–3650 м средний изотопный состав озерного льда за счет указанного тренда должен изменяться не менее чем на 0,1 ‰ для $\delta^{18}O$ и на ~0,4 ‰ для δD . Отсутствие подобного тренда в экспериментальных рядах $\delta^{18}O$ и $\delta^{18}O$ (см. рис. 12), казалось бы, не подтверждает нестационарный сценарий. И все же имеющиеся данные по изотопному составу озерного льда не позволяют полностью исключить возможность неравновесного состояния озера Восток.

В работе (Petit et al., 2008) описана теоретически допустимая ситуация, при которой озеро находится в нестационарном (с точки зрения баланса массы) состоянии, но при этом изотопный состав озерного льда не имеет указанного выше тренда. Необходимым условием для этого служит устойчивое, поддерживаемое в течение долгого времени превышение приходной части баланса массы над расходной приблизительно на 20%. Можно показать, что изотопное равновесие в этом случае должно установиться приблизительно через 200 тыс. лет после начала процесса увеличения объема воды в озере. Отсутствие тренда в распределении изотопных характеристик озерного льда по глубине может быть обеспечено при развитии событий по следующему сценарию. Не менее 240 тыс. лет назад происходит резкое уменьшение объема озера за счет катастрофического сброса воды («Йокульлаупа») в подледниковую гидрологическую систему (на возможность такого события с точки зрения гидродинамики указывает целый ряд исследователей, см. обзор в работе Ekaykin et al., 2010). Сразу после этого объем озера начинает восстанавливаться. Не менее 40 тыс. лет назад изотопный (но не массовый) баланс озера приходит в равновесие, в результате чего наблюдаемый изотопный профиль озерного льда (датируемый возрастом 40–20 тыс. лет назад.) не обнаруживает тренда.

Против этого сценария можно привести ряд существенных возражений. Во-первых, трудно представить, что объем озера мог равномерно увеличиваться на протяжении столь продолжительного времени, поскольку сразу после «Йокульлаупа» приток талой воды должен существенно (гораздо больше, чем на 20%) превышать ее расход на образование конгеляционного льда. Во-вторых, быстрые и существенные по амплитуде изменения в прошлом высоты поверхности ледника должны были привести к значительным пертурбациям в динамике ледникового покрова в районе озера Восток. Игнорирование этих изменений не позволило бы согласовать существующие модели растекания ледникового покрова, не учитывающие «Йокульлауп», с имеющимися для района озера гляциоклиматическими данными, что не соответствует реальному положению дел (Salamatin et al., 2009).

Характерная скорость подъема поверхности ледника в том случае, если объем озера продолжает увеличиваться в настоящее время, должна быть порядка 0,3–0,5 мм год⁻¹ (Ekaykin et al., 2010) Указанная величина существенно меньше

ошибки измерения вертикальных составляющих скорости движения ледника с помощью GPS (*Richter et al., 2008*). Необходим как минимум 20-летний период наблюдений, чтобы статистически надежно установить наличие или отсутствие вертикальных движений ледника, связанных с подобными медленными изменениями объема озера. Отметим, что пятилетние геодезические наблюдения в районе станции Восток свидетельствуют о равновесном (в пределах ошибки измерения) состоянии системы ледник–озеро в настоящее время (*Richter et al., 2008*).

Таким образом, анализ имеющихся данных приводит к выводу, что с большой долей вероятности озеро Восток в течение последних 40 тыс. лет находится в состоянии массового и изотопного равновесия.

11. Выводы и перспективы продолжения исследований

В период МПГ были завершены масштабные работы Российской антарктической экспедиции по картированию подледникового озера Восток, начатые в конце 90-х годов прошлого столетия. Получен большой объем геофизических данных, который позволил с достаточной степенью детальности охарактеризовать озеро Восток как географический объект и обоснованно говорить о его тектонической природе.

В результате проведения комплексных исследований керна озерного льда, поднятого из скважины на станции Восток, были установлены основные особенности изотопного, газового и гидрологического режимов озера. Показано, что существенную роль в гидрологическом режиме подледникового водоема играет гидротермальная деятельность, которая связана с циркуляцией инфильтрационной воды по глубоким разломам в земной коре под озером. Расход гидротермальных источников на дне озера оценивается в 3–6 млн тонн воды в год, что на порядок меньше массы воды, поступающей в подледниковый водоем за счет таяния льда в северной части озера (20–39 млн т). Заметим, что оценка расхода гидротермальных источников в пересчете на единицу площади озера соответствует интенсивности поступления воды порядка 10^{-1} кг м⁻² год⁻¹, что близко к усредненным по площади показателям расхода гидротермальных источников в Японии (*Fujio et al., 1999*).

Результаты газовых анализов ледяного керна подтверждают высокую концентрацию в озерной воде атмосферных газов, в том числе кислорода. Вместе с тем, содержание газов в верхнем слое озера, по-видимому, не достигает предельного уровня, соответствующего равновесию с гидратной фазой. В целом, данные об изотопном и газовом составе озерного льда свидетельствуют о недостаточно интенсивном перемешивании талой воды и воды, поступающей из гидротермальных источников, с резидентной водой озера. Характер изменения строения керна озерного льда по глубине говорит о возможности поступления переохлажденной воды из северных районов озера ко всем участкам линии тока ледника VFL, на которых происходило нарастание озерного льда. Установленные особенности гидрологического режима подледникового водоема свидетельствуют о том, что свойства воды, из которой образуется озерный лед, могут существенно отличаться от свойств резидентной воды озера.

Приведенные выводы и оценки основаны на предположении о стационарном состоянии озера Восток, при котором различие в изотопном составе талой ледниковой воды и озерного льда (1 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$) рассматривается как результат влияния гидротермальных процессов. Альтернативная интерпретация имеющихся изотопных данных приводит к выводу о нестационарном (с точки зрения баланса массы)

состоянии озера. Несмотря на то, что рассмотренный в статье сценарий, предполагающий катастрофический сброс воды из озера сотни тысяч лет назад, представляется нам сегодня маловероятным, окончательные ответы на этот и многие другие ключевые вопросы, касающиеся изотопного газового и гидрологического режимов этого уникального водоема можно будет дать только после проведения прямых измерений свойств озерной воды.

Накопленные к настоящему времени результаты микробиологических и молекулярно-биологических исследований ледниковой толщи над озером позволяют сделать предположение, что озеро Восток представляет собой единственную в своем роде гигантскую безжизненную водную систему на нашей «бактериальной» планете. Для того, чтобы проверить достоверность этого предположения, необходимо исследовать пробы подледниковой воды, которые предполагается получить в результате проникновения в озеро.

В ходе выполнения буровых работ на станции Восток в период МПГ были созданы технологические условия для нормального продолжения проходки нового ствола скважины 5Г-2. Это дает возможность достаточно уверенно планировать первое проникновение в подледниковое озеро Восток в летний антарктический сезон 2011/12 г.

Выполнение научной программы российских исследований озера Восток в период МПГ финансировалось через Федеральную целевую программу «Мировой океан». Дополнительное целевое финансирование на реализацию заключительной фазы работ по программе МПГ было выделено Правительством РФ через Росгидромет. Полевые работы в Антарктике, связанные с реализацией настоящего проекта, осуществлялись Российской антарктической экспедицией. Существенную финансовую поддержку работам по проекту изучения озера Восток оказал Российский фонд фундаментальных исследований.

Литература

Булат С.А., Алехина И.А., Пети Ж.Р. и др. Оценка биогеохимического потенциала подледникового озера Восток, Восточная Антарктида, в плане поддержания микробной жизни // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 76. С. 106–112.

Булат С.А., Алехина И.А., Липенков В.Я. и др. Клеточные концентрации микроорганизмов в атмосферном и озерном льду керна Восток, Восточная Антарктида // Микробиология. 2009. Т. 78. №6. С. 850–852.

Голубев В.Н. Закономерности ортотропного роста льда из пресной и минерализованной воды // Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 2. С. 48–56.

Екайкин А.А., Липенков В.Я., Йонсен С. и др. Изотопный состав воды подледникового озера Восток // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 92–99.

Екайкин А.А., Липенков В.Я., Полякова Е.В. и др. Новые данные о составе, строении и механизме образования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. Вып. 3 (83). С. 37–48.

Зотиков И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток (Антарктида) // ДАН. 2000. Т. 374. №6. С. 824–826.

Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Попов С.В. и др. О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по мате-

риалам сейсмологических наблюдений // Геотектоника. 2009. №3. С. 45–50.

Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М. и др. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 81–91.

Липенков В.Я., Истомин В.А., Преображенская А.В. Опыт исследования газового режима подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2003. Вып. 74. С. 66–87.

Липенков В.Я., Екайкин А.А., Шибачев Ю.А. и др. Гидрологический режим подледникового озера Восток по данным изучения керна озерного льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. (В печати).

Мандрикова Д.В., Липенков В.Я., Попов С.В. Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 65–72.

Попов С.В., Липенков В.Я., Еналиева В.В. и др. Внутриледниковые изохронные поверхности в районе озера Восток, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 76. С. 89–95.

Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лёд и снег. 2011. № 1 (113). С. 13–24.

Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подлёдный и коренной рельеф // Лёд и снег. 2011. № 1 (113). С. 25–35.

Цыганова Е.А., Попов С.В., Саламатин А.Н. и др. Результаты радиолокационного зондирования и моделирования ледникового покрова Восточной Антарктиды вдоль линии тока, проходящей через станцию Восток // Лёд и снег. 2010. Вып. 1 (109). С. 14–29.

Черепанов Н.В. Роль термического режима водоема в формировании кристаллической структуры льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1968. Вып. 29. С. 55–63.

Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.

Alekhina I.A., Marie D., Petit J.-R. et al. Molecular analysis of bacterial diversity in kerosene-based drilling fluid from the deep ice borehole at Vostok, East Antarctica //

FEMS Microbiology Ecology. 2007. V. 59. P. 289–299.

Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A. et al. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet // Nature. 2002. V. 416. P. 307–310.

Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Ya. et al. Limitations for life in Lake Vostok, Antarctica // EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, April 2003. Geophys. Research Abstracts. V. 5. Abstract 03288.

Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot et al. DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: implications for searching life in extreme icy environments // Intern. Journ. of Astrobiology. 2004. V. 3. № 1. P. 1–12. doi: 10.1017/S1473550404001879.

Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Ya. et al. Microbial Life in Extreme Subglacial Antarctic Lake Environments: Lake Vostok // Bresler Memorial Lectures II. RAS. PNPI. St.-Petersburg, 2007. P. 264–269.

de Angelis M., Petit J.R., Savarino J., Souchez R., Thiemens M.H. Contributions of an ancient evaporitic-type reservoir to subglacial Lake Vostok chemistry // Earth and Planetary Sciences Letters. 2004. V. 222. P. 751–765.

Dimarzio J., Brenner A., Schutz R. et al. GLAS/ICESat 500 m laser altimetry digital elevation model of Antarctica // Boulder. Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2007. Digital media

(ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/DEM/nsidc0304_icesat_antarctic_dem)

Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Petit J.R. et al. Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice // Journ. of Geophys. Research. doi:10.1029/2009JC005329.

Elia T., Veerapaneni R., Rogers S.O. Isolation of microbes from Lake Vostok accretion ice // Applied Environmental Microbiology. 2008. V. 74. P. 4962–4965.

Fricker H.A., Scambos T., Bindshadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // Science. 2007. V. 315. № 5818. P. 1544–1548.

Fujio A. Change and present condition of hot spring resources of Hokkaido on the basis of the data from used hot springs in each prefecture of Japan // Report of the Geological Survey of Hokkaido. 1999. V. 70. P. 27–43.

- Ikeda-Fukazawa T., Fukumizu K., Kawamura K. et al.* Effects of molecular diffusion on trapped gas composition in polar ice cores // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 229. P. 183–192.
- Jean-Baptiste P., Petit J.R., Lipenkov V.Ya. et al.* Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes // *Nature*. 2001. V. 411. P. 460–462.
- Jouzel, J., Petit J.R., Souchez R. et al.* More than 200 meters of lake ice above subglacial lake Vostok, Antarctica // *Science*. 1999. V. 286. P. 2138–2141.
- Karl D.M., Bird D.F., Bjorkman K. et al.* Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok, Antarctica // *Science*. 1999. V. 286. P. 2144–2147.
- Lavire, C., Normand P., Alekhina I. et al.* Presence of *Hydrogenophylus thermoluteolus* DNA in accretion ice in the subglacial Lake Vostok, Antarctica // *Environmental Microbiology*. 2006. V. 8. № 12. P. 2106–2114.
- Leitchenkov G.L., Belyatsky B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A.* Insight into the geology of the East Antarctic hinterland: study of sediment inclusions from ice cores of the Lake Vostok borehole // *Antarctica: A Keystone in a Changing World*. USGS Open-File Report. 2007. P. 1047. Short Research Paper 014. doi:10.3133/of 2007–1047.srp014.
- Lipenkov V.Ya., Istomin V.A.* On the stability of air clathrate-hydrate crystals in subglacial lake Vostok, Antarctica // *Материалы гляциол. исследований*. 2001. Вып. 91. С. 138–149.
- Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V. et al.* Russian geophysical studies of Lake Vostok, Central East Antarctica // *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg. New York, 2006. P. 135–140.
- McKay C.P., Hand K.P., Doran P.T. et al.* Clathrate formation and the fate of noble and biologically useful gases in Lake Vostok, Antarctica // *Geophys. Research Letters*. 2003. V. 30. № 13. P. 1702–1705.
- Petit J.R., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y.* Has water volume of the Vostok subglacial lake doubled since the last 0.5 millions years? A hint from balance of stable isotope // *SCAR Open Science Conference (St. Petersburg, Russia)*. 2008. V. S3.1. Abstract № O14.
- Popov S.V., Lastochkin A.N., Masolov V.N. et al.* Morphology of the subglacial bed relief of Lake Vostok basin area (Central East Antarctica) based on RES and seismic data // *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg. New York, 2006. P. 141–146.
- Priscu J.C., Adams E.E., Lyons W.B. et al.* Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica // *Science*. 1999. V. 286. P. 2141–2144.
- Richter A., Popov S.V., Dietrich R. et al.* Observational evidence on the stability of the hydro-glaciological regime of subglacial Lake Vostok // *Geophys. Research Letters*. 2008. V. 35. L11502. doi:10.1029/2008GL033397.
- Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Lipenkov V.Ya. et al.* Vostok (Antarctica) ice-core time-scale from dating of different origins // *Annals of Glaciology*. 2004. V. 39. P. 283–292.
- Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V. et al.* Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica) // *Physics of Ice Core Records*. V. 2. Hokkaido University Press, 2009. P. 167–194.
- Siegert M.J., Le Brocq A., Payne A.J.* Hydrological connections between Antarctic subglacial lakes, the flow of water beneath the East Antarctic Ice Sheet and implications for sedimentary processes // *Glacial Processes and Products: Intern. Association of Sedimentologists*. 2007. P. 120–135.
- Studinger M., Bell R., Kerner G.D. et al.* Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *Earth Planetary Science Letters*. 2003. V. 205. P. 195–210.
- Studinger M., Bell R.E., Tikku A.A.* Estimating the depth and shape of subglacial Lake Vostok's water cavity from aerogravity data // *Geophys. Research Letters*. 2004. V. 31. P. L12401, doi:10.1029/2004GL019801.
- Vasiliev N.I., Talalay P.G., Bobin N.E. et al.* Deep drilling at Vostok Station, Antarctica: history and recent events // *Annals of Glaciology*. 2007. V. 47. P. 10–23.
- Wharton R.A. Jr., McKay C.P., Simmons G.M. Jr. et al.* Oxygen budget of a perennially ice-covered Antarctic lake // *Limnology and Oceanography*. 1986. V. 31. P. 437–443.
- Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A. et al.* Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature*. 2006. V. 440. P. 1033–1036.

Scientific outcomes of subglacial Lake Vostok studies in the IPY

V.Ya. Lipenkov¹, V.V. Lukin¹, S.A. Bula², N.I. Vasiliev³,
A.A. Ekaykin¹, G.L. Leitchnikov⁴, V.N. Masolov⁵,
S.V. Popov⁵, L.M. Savatyugin¹, A.N. Salamatin⁶,
Yu.A. Shibaev¹

1 – Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

2 – B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS, St. Petersburg, Russia

3 St. Petersburg State Mining Institute, St. Petersburg, Russia

4 – The All-Russia Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources
of the World Ocean, St. Petersburg, Russia

5 – State Enterprise «Polar Marine Geosurvey Expedition», St. Petersburg, Lomonosov, Russia

6 – Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract

During the International Polar Year, Russian studies of subglacial Lake Vostok, considered as a contribution to the SALE-UNITED core project of the IPY, have been continued in the frame of the long-term Federal Targeted Program «World Ocean». The interdisciplinary program of the project covering all major scientific and technological aspects of the SALE exploration has been implemented by a consortium of eight Russian research institutions led by Arctic and Antarctic Research Institute of Roshydromet.

The overall length of the geophysical traverses completed in the Lake Vostok area by February 2008 exceeds 6000 km with a total number of seismic measurements of 320. The main output of this large-scale field activity is a series of maps displaying the LV water table limits, the ice and water body thickness, the bedrock relief, its geomorphological zoning and the spatial pattern of the internal layers in the overlying ice sheet.

During the IPY, the coring of lake ice at Vostok Station was resumed and advanced to 3667 mbs. i.e., to a depth horizon lying eighty-some meters above the lake water surface. This allowed extending the ice core isotopic profile of accreted ice to 3650 m depth thus covering the upper 41 m section of lake ice 2. Thorough analysis of the available data set with the aid of an isotopic model of Lake Vostok reveals significant spatial and/or temporal variability of physical conditions prevailing at ice formation, as well as instability of isotopic content of freezing lake water. The data suggest significant (3–6 mm of water per year) contribution of a hydrothermal source to the hydrological regime of LV.

Results of gas content measurements performed on the accreted ice show that the actual concentration of gases dissolved in the upper boundary layer of lake is slightly lower than predicted by theory. The new gas content measurements, if interpreted jointly with the lake ice isotopic profile and the data on the «water

pocket» formation, add new essential details to notion of both the mechanism of lake ice accretion and the gas distribution in Lake Vostok, as affected by circulation and mixing of water beneath the ice sheet.

A special effort has been undertaken to accurately assess the cell concentration of microorganisms throughout the whole section of the Antarctic ice sheet in the vicinity of Vostok, from the surface snow to lake ice 2. The data obtained for contemporary snow and glacial (meteoric) ice suggest that the Antarctic ice sheet sealing Lake Vostok from above serves as a barrier preventing the contact of the potential lake biota with the surface rather than as a conveyor of the dormant microorganisms inoculating the lake water. The extraordinary purity of lake ice may in turn be regarded as indirect evidence that Lake Vostok water itself should be poor in microbial content as well. Judging from current knowledge of the LV conditions inferred from the accretion ice studies and modeling one should expect that the lake water might be inhabited by «oxygenophilic» chemoautotrophic piezophilic psychrophiles, though no signs of presence of such microorganisms in accretion ice has yet been found.

Fuelled by compelling experimental evidence, there has been growing appreciation that the main water body of Lake Vostok might represent an extraordinarily lifeless aquatic system that, in our «bacterial world», provides a unique experimental test area for developing methods and approaches for searching for life in extreme environments such as those that occur beyond our planet. The new «Lake Vostok paradigm» that has emerged because of extensive biological studies of the Vostok ice samples during the IPY will have to be tested in the course of anticipated direct sampling of lake water.