

## ОТКРЫТИЕ, КОТОРОГО ЖДАЛИ, – ДОСТИГНУТО ОЗЕРО ВОСТОК

5 февраля 2012 г. произошло историческое для всей антарктической науки событие – глубокая скважина, которую в течение многих лет бурили на станции Восток в Антарктиде, достигла наконец поверхности крупнейшего на нашей планете подледникового озера Восток. Этот успех российских ученых, который по времени совпал со столетней годовщиной первого достижения Южного полюса Земли, получил широкое освещение в отечественных и зарубежных средствах массовой информации и наиболее известных международных научных журналах, таких как Science и Nature.

Корреспондент сборника РПИ встретился с участниками проекта исследования озера Восток, который осуществляется в рамках подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан». Участники беседы: заведующий лабораторией изменений климата и окружающей среды ААНИИ, руководитель проекта исследования озера Восток Владимир Яковлевич Липенков, заведующий кафедрой бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета, руководитель буровых работ на станции Восток Николай Иванович Васильев, руководитель группы криоастробиологии отделения молекулярной и радиационной физики Петербургского института ядерной физики им. Б.П.Константинова Сергей Алексеевич Булат, заведующий отделом геологии и минеральных ресурсов Антарктики Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана Герман Леонидович Лейченков и начальник Антарктической геофизической партии Полярной морской геологоразведочной экспедиции Валерий Николаевич Масолов.

*Владимир Яковлевич, озеро Восток расположено в труднодоступном районе Восточной Антарктиды и залегает под четырехкилометровой толщиной антарктического льда. Исследования этого природного объекта, по-видимому, связаны со значительными финансовыми затратами. Как они оправдываются? Зачем вообще исследовать это озеро?*



*В.Я.Липенков.* Озеро Восток – важнейший и крупнейший элемент подледниковой гидрологической системы Антарктиды, которая в значительной степени определяет динамику антарктического ледникового покрова и его вклад в изменения уровня Мирового океана в условиях меняющегося климата. По объему воды (более 6 тыс. км<sup>3</sup>) озеро Восток

занимает пятое место среди пресноводных водоемов нашей планеты. История возникновения, эволюция и современный режим этого уникального водоема тесно связаны с геологическим строением, историей климата и оледенения шестого материка. 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 от атмосферы и поверхностной биосферы предполагают возможность сохранения здесь реликтовых форм жизни и проявления еще неизвестных 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. Большое внимание в последнее время уделяется вопросам стабильности озера Восток и вероятности катастрофических сбросов воды из озера. Это связано с недавно зарегистрированными быстрыми изменениями высоты поверхности ледникового покрова в различных районах Антарктиды, предположительно вызванными перераспределением значительных масс воды между подледниковыми водоемами.

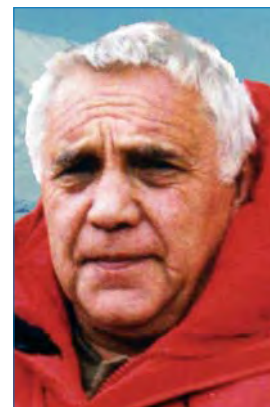
Таким образом, исследования озера Восток носят фундаментальный, фронтальный характер, и, следовательно, их социально-экономическая эффективность определяется приростом новых знаний о природе шестого континента – знаний, которые позволяют нам лучше прогнозировать изменения природной среды Антарктиды и понимать их связь с глобальными изменениями, происходящими на нашей планете. Кроме того, подобно космическим проектам, проект исследования озера Восток выполняет также важную социальную задачу. Привлекая к себе внимание широкой публики и СМИ, он оказывает позитивное влияние на развитие образования, воспитание молодежи, повышение престижа отечественной науки и государства в целом.

*Какие методы используются для исследования озера Восток?*

На первом этапе изучения озера Восток – до проникновения в подледниковый водоем – его исследования проводились методами дистанционных геофизических измерений и посредством комплексных анализов кернов озерного льда, поднятых на поверхность в результате глубокого бурения ледника на станции Восток. Достижение буровой скважиной поверхности озера Восток знаменует собой начало принципиально нового этапа прямых исследований водной толщи озера с помощью спускаемых через скважину зондирующих и пробоотборных аппаратов.

*Валерий Николаевич, расскажите о наиболее значимых результатах, которые были получены в ходе отечественных геофизических работ.*

*В.Н.Масолов.* Прежде всего, в ходе наземных сейсмических и радиолокационных исследований были определены средние скорости распространения акустических и электромагнитных волн в теле ледника. Сейчас этими данными пользуются все исследователи, проводящие аналогичные работы в Центральной Антарктиде, что видно по количеству ссылок на наши опубликованные работы. Это, в свою очередь, позволило определить



толщину ледника в районе скважины 5Г на станции Восток. По сейсмическим данным она составила 3760 м и 3775 м по радиолокационным измерениям против 3769 м, согласно данным бурения. Таким образом, ошибка измерений составила доли процента, что само по себе свидетельствует о весьма высоком профессионализме исполнителей и качестве этих работ. Именно отечественные радиолокационные исследования позволили определить береговую линию озера Восток и обоснованно показать, что озеро является именно замкнутым водоемом. В ходе комплексного анализа всех доступных данных нами было выявлено 11 островов, расположенных в пределах акватории озера, и 56 подледниковых водоемов, размерами всего в несколько километров. И наконец, именно в ходе отечественных сейсмических исследований было составлено целостное представление о глубинах озера Восток и рельефе его дна.

*Геофизические работы в районе подледникового озера Восток выполняли американские и итальянские ученые. В чем отличие их исследований от отечественных?*

Да, действительно, в этом районе в сезон 1999/2000 г. комплексные аэрогеофизические исследования по региональным маршрутам выполняли итальянские ученые. На следующий год подобные работы, но уже по регулярной сети маршрутов через 7,5 км осуществили американские исследователи. Различие заключается в задачах и возможностях наземных и авиационных работ. При этом они не конкурируют между собой, а органично дополняют друг друга. Судите сами, с одной стороны, авиационные работы более мобильные и позволяют в короткое время покрыть съемкой значительные территории. Но с другой стороны, наземные работы точнее и имеют больший спектр возможностей. В частности, только с наземных носителей можно выполнить сейсмические, гляциологические и геодезические исследования, а также работы по определению скорости распространения волн в леднике, что крайне важно при интерпретации геофизических данных. Далее, как частный случай, наземное радиолокационное профилирование, при прочих равных условиях, более глубокий метод по сравнению с авиационным, поскольку при использовании последнего, часть излученной энергии тратится на пересечение границы раздела «воздух–лед» в оба конца, кроме того, имеются потери на геометрическое расхождение фронта волны в воздухе.

*Создается впечатление, что геофизические исследования на озере Восток завершены и принципиально ничего нового получить уже не удастся. Так ли это? Видите ли вы перспективы продолжения геофизических работ в этом районе?*

Озеро Восток – это уникальный геологический и географический объект, и мы только-только прикоснулись к его тайнам. Да, за долгие годы работы мы изучили его как географический объект, но при этом осталась масса нерешенных до сих пор вопросов. Среди наиболее важных можно отметить, в част-

ности, такие: какова мощность осадочных пород на дне озера, когда оно возникло и как развивалось. Имеются и более глобальные проблемы, затрагивающие строение и эволюцию всего континента. Не секрет, что даже сейчас Антарктида продолжает оставаться «белым пятном» и представление о ней все еще достаточно поверхностное. Озеро Восток располагается в желобе, который, судя по региональным построениям, является частью глубинного разлома протяженностью в тысячи километров. Таким образом, продолжая изучать район озера Восток и прилегающие территории, мы одновременно расширяем свое представление и о строении Восточной Антарктиды.

*Николай Иванович, в чем заключаются особенности бурения глубоких скважин во льду?*



*Н.И. Васильев.* Бурением глубоких скважин во льду занимаются специалисты многих развитых стран в течение последних 50 лет. Специфика условий Антарктиды – значительная удаленность, полное бездорожье, крайне суровый климат – предъявляет особые требования к буровому оборудованию, технологии, органи-

зации работ и подготовке персонала. Основные требования к буровому оборудованию – низкая энергоемкость, минимально возможный вес, высокое качество керна. Отличительной особенностью технологии бурения льда является получение непрерывного керна, необходимого для проведения всесторонних научных исследований, что требует больших затрат времени на проведение спуско-подъемных операций. Исходя из этих требований, наибольшее распространение для бурения скважин во льду получил способ бурения колонковыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле, который в данном случае выполняет роль гибкой буровой колонны.

При бурении глубоких скважин как в Антарктиде, так и в Гренландии исследователи всех стран столкнулись с серьезными осложнениями на различных глубинах, особенно после достижения глубин свыше 2500 м. На глубинах свыше 3000 м осложнения становились столь значительными, что бурение практически останавливалось. Это явление даже получило название – «проблема бурения теплого льда», так как с глубиной температура льда повышается. При бурении скважин в районе итальянской станции Конкордия по европейской программе EPICA незначительное снижение рейсовой проходки началось уже при достижении глубин свыше 2500 м, затем с ростом глубины рейсовая проходка начала резко снижаться, а после достижения 3000 м бурение практически остановилось. При касании забоя на любых скоростях подачи происходило зашламование коронки и остановка бурения. При этом не удавалось

оказать какое-либо влияние на процесс бурения с поверхности. Похожие проблемы возникали перед нами при бурении скважины 5Г на станции Восток. После достижения глубины 3000 м процесс бурения стал нестабильным, а с глубины 3400 м проходка за рейс резко снизилась. Лишь благодаря детальному анализу каждого рейса и свойств льда, меняющихся с глубиной, нам удалось разобраться с возникшими проблемами и решить их.

*Какие основные научные результаты были получены в ходе разработки технологии бурения и выполнения буровых работ на станции Восток?*

Главным результатом выполненных работ мы считаем успешное вскрытие озера Восток, что стало возможным благодаря разработанной экологически безопасной технологии, в частности методики поддержания дифференциального давления столба заливочной жидкости, что обеспечило подъем озерной воды в скважину. Благодаря этому удалось полностью исключить попадание заливочной жидкости в озеро.

Важнейшим результатом, полученным при бурении скважины, особенно глубже 3000 м, является то, что нам удалось разобраться в причинах осложнений, возникающих при бурении на больших глубинах. На основе анализа экспериментальных данных была проведена модернизация технологии и оборудования, что позволило стабилизировать процесс бурения. Были определены оптимальные параметры процесса бурения льда с учетом изменения его физико-механических свойств с повышением глубины и найдена оптимальная геометрическая форма буровой коронки, позволяющая стабильно бурить скважины во льдах при любых термобарических условиях.

*Что вы лично чувствовали, о чем думали в момент вскрытия озера?*

В первый момент, когда сработали датчики, все мысли были лишь о том, что нужно обеспечить скорейший подъем снаряда на поверхность. Осознание того, что мы завершили многолетний этап работы большого коллектива, пришло лишь после извлечения снаряда на поверхность. Конечно, у всех было приподнятое настроение сразу после вскрытия озера, но я смог расслабиться лишь после того, как на поверхность была извлечена 13-метровая сосулька, в которую превратился буровой снаряд. То, что поверхность бурового снаряда была покрыта льдом, и было основной причиной волнения. Так как диаметр керна позволял косвенно судить лишь о свойствах приповерхностной воды, из которой образовывался озерный лед. Более того, многие сделанные нами выводы и оценки основаны на предположении о стационарном состоянии озера Восток. Однако существует альтернативная интерпретация имеющихся изотопных данных, которая приводит к выводу о нестационарном (с точки зрения баланса массы) состоянии озера. Для окончательного разрешения всех сомнений по поводу современного режима озера Восток необходимо выполнить измерения газового и изотопного состава воды на различных расстояниях от ледяного потолка озера.

*Владимир Яковлевич, что нам известно о свойствах воды озера Восток и его гидрологическом режиме по результатам исследований озерного льда, поднятого на поверхность в виде керна?*

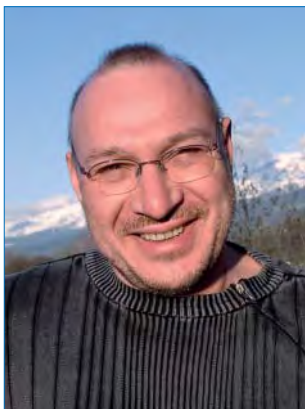


Буровая коронка с зашламованным промывочным окном.  
Фото В.Я.Липенкова.

*В.Я.Липенков.* Довольно много и почти ничего. Я имею в виду, что все наши знания, полученные до настоящего времени на основе интерпретации результатов изучения озерного льда и моделирования, имеют предварительный характер и требуют проверки в ходе прямых исследований водной толщи озера. Да, нами были установлены основные особенности изотопного, газового и гидрологического режимов озера. Показано, что существенную роль в гидрологическом режиме водоема играет гидротермальная деятельность, которая связана с циркуляцией инфильтрационной воды по глубоким разломам в земной коре под озером. Однако вклад гидротермальных источников оценен пока лишь приблизительно. Результаты газовых анализов ледяного керна подтверждают теоретически предсказанную высокую концентрацию атмосферных газов, в том числе кислорода, в воде озера. 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, и, следовательно, результаты исследований ледяного керна позволяют косвенно судить лишь о свойствах приповерхностной воды, из которой образовывался озерный лед. Более того, многие сделанные нами выводы и оценки основаны на предположении о стационарном состоянии озера Восток. Однако существует альтернативная интерпретация имеющихся изотопных данных, которая приводит к выводу о нестационарном (с точки зрения баланса массы) состоянии озера. Для окончательного разрешения всех сомнений по поводу современного режима озера Восток необходимо выполнить измерения газового и изотопного состава воды на различных расстояниях от ледяного потолка озера.



*Сергей Алексеевич, так есть ли на самом деле жизнь в озере Восток, и если есть, то в каких формах? Микроорганизмы, простейшие, беспозвоночные, высшие?*



**С.А.Булат.** Антарктида начала становиться такой, какой мы ее знаем, примерно 30–35 млн лет назад, а последние 14–15 млн лет центральная часть континента оказалась постоянно покрытой льдом. При похолодании высшая жизнь в озере, если она существовала до этого, прекратилась, могли сохраниться разве что ее палеонтологические свидетельства в

осадочных породах. Но можно представить, что вездесущие микроорганизмы выжили, постепенно адаптировались и к холоду, и, главное, к растущему в воде содержанию кислорода. По этому поводу сейчас есть две точки зрения. Первая — в воде озера Восток нет жизни, она стерильна, в частности, из-за высокой концентрации кислорода в воде. Согласно второй, какие-то формы жизни сумели приспособиться к этим условиям. Мы не знаем, насколько велик эволюционный потенциал микроорганизмов, в том числе бактерий. И мы сейчас не можем представить, какими могут быть эти бактерии, какие они выработали способы защиты от кислорода. Экологические ниши, сходные с Востоком, еще не изучались, так что можно сказать одно: если какие-то формы жизни будут найдены, это будут необычные, до сих пор неизвестные на нашей планете Земля микроорганизмы. Однако нужно иметь в виду, что слой воды непосредственно под ледником может быть обедненным микроорганизмами по сравнению с глубинными горизонтами. Озеро огромное, как в нем происходит циркуляция воды, мы пока представляем только на уровне моделей, но очевидно, что поверхностный слой переохлажден. Живые организмы скорее будут обитать в средней толще воды либо у дна.

*Что, по вашему мнению, является основным лимитирующим фактором для развития (поддержания) жизни в водном слое озера?*

Основным лимитирующим фактором для поддержания жизни в водном слое озера может быть избыток (при общем давлении 400 атм) растворенного в воде кислорода. Показано, что этот газ в больших количествах (более 175 мг на литр) при нормальном атмосферном давлении губителен для любых форм земной жизни, так как является сильным окислителем, от которого страдают в первую очередь, белки — структура и сонм метаболических реакций клетки. Кроме того, избытком кислорода (как окислителя) может быть обусловлен недостаток или даже отсутствие достаточного количества питательных веществ и источника энергии в виде соединений органического углерода и основных химических ионов-восстановителей (доноров электронов), составляю-

щих так называемые редокс-пары — «генераторы» энергии, ибо, как ожидается, среда должна быть кислой. В данном случае речь идет о единственно возможной форме жизни — хемолитоавтотрофных микроорганизмах, которым не нужен свет и органический углерод и которые живут за счет энергии окислительно-восстановительных реакций неорганических ионов и молекул глубоко под поверхностью дна озера.

*Можете ли вы допустить, что водная толща озера вообще лишена признаков жизни (т.е. стерильна)?*

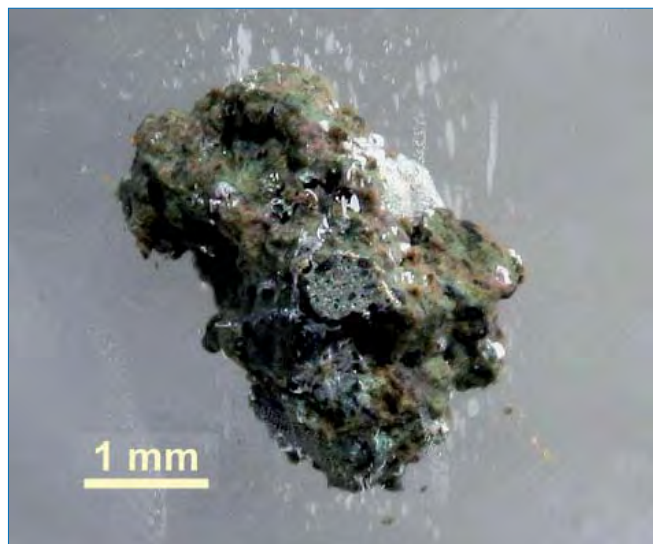
Да, это возможно, хотя и зависит от интенсивности циркуляции воды в озере. И не просто стерильна, но и останков прошлых форм не будет — даже ДНК (основная информативная молекула земной жизни) будет окислена и «разрушена», а значит, не пригодна для обнаружения каких-либо форм жизни, включая микробную. И тогда формы «ныне живущей» микробной жизни следует ожидать лишь в осадках озера, которые должны быть обеднены или не содержать кислород вовсе. Кроме того, достаточно толстый слой (до 300 м) неконсолидированных осадков на дне озера может содержать «архив» прошлой, существовавшей миллионы лет назад жизни. По «древней» ДНК можно воссоздать флору и фауну (и микробиоту) в любой момент прошлой истории озера (по крайней мере за последние 3 млн лет).

*Герман Леонидович, какую информацию содержат донные отложения озера Восток и что может дать их изучение?*



**Г.Л.Лейченков.** Осадки, отлагавшиеся в озере Восток, испытывали прямое влияние природных процессов, происходивших в Центральной Антарктиде, и поэтому содержат уникальные сведения об изменениях ее природной среды и климата, а также о геологическом строении этой, пока еще абсолютно неизученной, территории.

Недавние сейсмические исследования Полярной морской геологоразведочной экспедиции показали, что в южной части озера Восток осадочные отложения имеют незначительную мощность 200–300 м и подстилаются породами кристаллического фундамента. Эти данные противоречат существующим сегодня представлениям о древнем, более 100 млн лет, возрасте образования озерной впадины, так как в этом случае толщина осадочного слоя была бы намного больше. До начала оледенения, около 34 млн лет назад, в Антарктиде преобладал влажный и теплый до умеренного климат, а развитые речные системы были способны быстро заполнять крупные понижения рельефа. Например, в озере Байкал, имеющем сходную тектоническую структуру с озером Восток, накопилось более 4 км осадков за 35 млн лет его существования, а в восточноафриканском озере Танганьика — от 3 до 4 км всего за 12–10 млн лет.



«Крупное» включение донных осадков озера, захваченное озерным льдом (глубина 3607 м), предположительно содержащее газовый гидрат.  
Фото В.Я.Липенкова.

Чтобы сделать заключение о возрасте депрессии озера Восток и имеющихся там рыхлых отложений необходимо оценить обстановки и темпы осадконакопления в геологическом прошлом, опираясь на существующие модели изменения природной среды. Предполагается, что на протяжении последних 14–12 млн лет ледовый щит Восточной Антарктиды находился в относительно устойчивом состоянии и имел сухое ложе с крайне низкой способностью к эрозии подстилающих коренных пород, в результате чего осадконакопление в глубоководной части озера, над которой расположена станция Восток, фактически отсутствовало. Вероятнее всего, обломочный материал в основном поступал сюда в периоды межледниковий олигоцена и раннего-среднего миоцена, от 34 до 14 млн лет назад. Косвенные данные указывают на то, что в этот период объем антарктического льда менялся от 30 до 130 % по отношению к современному, однако никаких точных доказательств этого нет.

Необходимо напомнить, что все данные об изменениях природной среды Антарктики получены на побережье или в Южном океане и поэтому модели ее эволюции в геологическом прошлом очень приблизительны. Сегодня очень важно понять, насколько ледниковый щит и его дренажные системы в виде вывальных и шельфовых ледников чувствительны к таким внешним воздействиям, как изменение количества парниковых газов в атмосфере, уровня Мирового океана, подледного стока и др., так как понимание этого дает возможность прогнозировать их поведение в будущем. Изучение осадочных отложений озера Восток позволит существенно улучшить наши знания в этих вопросах и, возможно, даже полностью изменить сложившиеся представления.

В заключение я хотел бы сказать, что вскрытие подледникового озера Восток, которое произошло в этом году, является очень важным технологическим достижением, но дальнейшие исследования состава озерной воды вряд ли дадут какие-либо экстраординарные

результаты, так как сведения об этом во многом уже были получены при изучении слоя озерного льда, т.е. воды, намерзшей на подошве ледника. Мне кажется, что это достижение надо рассматривать как промежуточный этап для решения гораздо более амбициозной и важной задачи, связанной с опробованием осадков. В Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 г. и на более удаленную перспективу, утвержденной Правительством РФ, сказано, что «традиционные геофизические методы исследования осадочного чехла континента и дна океана могут быть дополнены наиболее эффективными методами стратиграфического бурения...». При существующей международной программе антарктического бурения ANDRILL вряд ли стоит проводить собственные бурения в окраинных осадочных бассейнах, но выполнение этой задачи на станции Восток могло бы быть весьма достойным вкладом в программу ANDRILL и серьезно поднять авторитет нашего государства в антарктических исследованиях.

*Владимир Яковлевич, Герман Леонидович высказал сомнения по поводу возможности получения существенной новой информации при изучении водного слоя озера. Каково ваше мнение по этому вопросу? Каковы первоочередные задачи дальнейших исследований озера после его первого вскрытия?*

*В.Я.Липенков.* Безусловно, исследование донных осадков озера может дать интереснейшие научные результаты в области геологии, палеогеографии и биологии, и мы, конечно, должны готовиться к осуществлению этого амбициозного проекта. Тем не менее я уверен, что прямые исследования водного тела озера также принесут много новых открытий. Фундаментальными научными проблемами, которые остались не решенными на первом этапе изучения озера Восток (по ледяным кернам) и которые можно и нужно решить в ходе повторного проникновения в подледниковый водоем, являются: определение возраста озера как водного тела, оценка степени изолированности озера от других элементов подледникового гидрологической системы Антарктиды, проблема стационарности системы ледник–озеро, определение концентрации, видового состава и механизмов адаптации микроорганизмов, населяющих водную толщу озера (или подтверждение ее стерильности). Мы ожидаем, что определенное продвижение в решении этих проблем будет достигнуто уже на стадии исследования замерзшей в скважине озерной воды, образцы которой будут подняты на поверхность в виде ледяного керна в ходе повторного бурения скважины в сезонный период 58-й РАЭ (2012/2013 г.). Однако только прямые исследования водной толщи озера с помощью зондирующих и пробоотборных аппаратов, которые будут опускаться в озеро через буровую скважину на станции Восток, дадут нам ту информацию о газовом, изотопном, химическом и биологическом составе озерной воды на разных глубинах, которая совершенно необходима для решения указанных проблем. Эти исследования планируется провести в 2014–2018 гг.