

Проблемы защиты окружающей среды и экологического мониторинга в проектах изучения подледниковых озёр Антарктиды

© 2012 г. И.А. Алехина¹, Н.И. Васильев², В.Я. Липенков¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург;

²Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (СПГИ), Санкт-Петербург

alekhina@aari.ru

Статья принята к печати 22 августа 2012 г.

Ароматические углеводороды, глубокое бурение, керосин, контроль загрязнения, ледяной керн, микроорганизмы, подледниковые озёра, форан.

Aromatic hydrocarbons, contamination control, deep drilling, forane, kerosene, ice core, microbes, subglacial lakes.

В настоящее время на разных стадиях подготовки и реализации находятся три крупных проекта исследования подледниковых водоёмов Антарктиды – российский проект исследования озера Восток, сходный проект Великобритании по изучению озера Эллсуорт и американский проект по проникновению и взятию проб под ледниковым потоком Вильянс в Западной Антарктиде. В статье обсуждается программа экологического сопровождения прямых исследований этих уникальных природных объектов. Дан обзор документов, которые служат основой для выработки долгосрочной стратегии комплексных исследований и сохранения в первозданном виде подледниковой антарктической среды.

Введение

Известно, что в Антарктиде существует более 350 подледниковых озёр [45], которые потенциально относятся к экстремальным природным местообитаниям микроорганизмов и могут содержать в своих осадках информацию об истории ледникового щита и климатических изменений. Исследования этих водоёмов всё ещё находятся на начальной стадии развития, поэтому ответов на многие ключевые вопросы о природе подледниковых озёр до сих пор нет. К ним, прежде всего, относятся проблема существования и разнообразия жизни в подледниковых водоёмах, а также вопросы, связанные с газовым, изотопным и гидрологическим режимом озёр. Учёные подошли к тому моменту, когда только прямые исследования и отбор проб озёрной воды и донных осадков помогут решить стоящие перед ними научные задачи. Такие исследования только предстоит провести в ближайшем будущем. Вместе с тем возможность найти уникальные живые организмы и изучить механизмы их эволюционной адаптации в экстремальных условиях изолированных и всё ещё не нарушенных человеческим вмешательством водоёмов предполагает создание специальных программ экологического сопровождения проектов исследований этих природных объектов. Особая предосторожность должна соблюдаться при непосредственном проникновении в эти уникальные местообитания во избежание неблагоприятных воздействий и внесения постороннего загрязнения. Рядом международных и национальных организаций были разработаны рекомендации по уровням чистоты и стерильности во время прямых исследований подледнико-

вых озёр. Экологическое сопровождение проектов Восток, Эллсуорт и Вильянс должно обеспечить минимальное постороннее воздействие с получением максимального научного эффекта, не ставя под угрозу эти реликтовые местообитания для будущих экспериментов.

История вопроса и существующие документы

Политика планетарной защиты. Стратегия защиты окружающей среды при исследованиях в Антарктиде имеет много общего с экологической стратегией, проводимой при изучении и освоении космоса [33]. Обе эти области, хотя и достаточно враждебные человеку, но всё же представляющие собой хрупкие местообитания, сегодня испытывают всё возрастающий интерес к их изучению. Экологические проблемы, которые необходимо решать при поисках жизни в подледниковых антарктических водоёмах, похожи на те, с которыми сталкиваются учёные при исследовании внеземных местообитаний, например, таких как спутники Юпитера (Европа) и Сатурна (Энцеладус), полюсы Марса. Таким образом, подледниковые антарктические озёра могут служить испытательными площадками для отработки технологий и протоколов поиска внеземной жизни [11, 13].

Меры планетарной защиты (Planetary Protection Policy) были определены международным правом и впервые сформулированы в Международном Договоре о космосе 1967 года [35, 36]. Реализацией этой политики в наши дни занимается Комитет по космическим исследованиям (КОСПАР) при Международном совете по науке ООН. Под термином планетарной защиты понимают, с одной стороны, меры предохранения планет Солнечной

системы от земного микробиологического загрязнения, а с другой — защиту Земли от возможного биологического загрязнения, исходящего от внеземных образцов и/или возвращаемых объектов. Политика планетарной защиты, прежде всего, направлена на сохранение нашей способности изучать другие миры в их нетронутом, естественном виде, на удалении вносимого загрязнения, которое могло бы помешать найти уникальную жизнь на других планетах или лунах (если она там существует), и на проведение необходимых и достаточных мер по защите биосферы Земли. Меры планетарной защиты постоянно развиваются в соответствии с планированием и проведением межпланетных экспедиций [39, 40, 42].

Существует два разных подхода к планетарной защите, отличающихся этическими принципами, положенными в их основу. К первому относится принцип сохранения (preservation ethic), при котором человеческое вмешательство в природу должно быть минимальным и обеспечивать неизменность изучаемой среды. Второй — так называемое экологическое сопровождение (stewardship) или рациональное природопользование (resource management), при котором допускается некоторое изменение изучаемой среды, когда это необходимо (т.е. оправдывается) с научной или практической точек зрения [25, 34]. На практике второму принципу, предполагающему поддержание баланса между загрязнением и проведением строго научного и эффективного исследования, следовать сложно.

В случае оз. Восток и других антарктических подледниковых озёр, которые могли быть изолированы от окружающей среды миллионы лет [2, 22], сейчас проводится политика именно экологического и научного сопровождения. При этом защитные меры должны быть направлены, прежде всего, на максимальное сохранение целостности исследуемых уникальных земных объектов, что продиктовано реликтовой природой подледниковых местообитаний и их почти полностью не известной нам способностью поддерживать живые экосистемы. Именно поэтому к самым острым проблемам при исследованиях подледниковых озёр, включая оз. Восток, относятся, с одной стороны, возможное загрязнение самих водоёмов, а с другой — загрязнение образцов, по результатам изучения которых будут делать выводы о жизни в этих водных экосистемах. С точки зрения охраны окружающей среды в истории изучения антарктических подледниковых местообитаний отмечено несколько этапных событий.

Протокол по охране окружающей среды к Договору об Антарктике и Программа SALE. Основные положения о защите окружающей среды в Антарктике разработаны в 1990-х годах в Протоколе по охране окружающей среды к Договору об Антарктике (Мадридский протокол) и в его соответствующих приложениях о предотвращении морского загрязнения, сохранении антарктической флоры и фауны, утилизации отходов и оценке воздей-

ствия на окружающую среду. Именно Мадридский протокол устанавливает общие принципы и требования, определяющие основные рамки экологического сопровождения при изучении антарктических подледниковых водных местообитаний. Для нескольких поверхностных водоёмов в Антарктиде, которые также относятся к необычным местообитаниям, уже разработаны определённые дополнительные меры защиты, среди которых — детальные планы исследований, придание им статуса особо охраняемых территорий и введение экологических Кодексов проведения исследований.

Более конкретные разработки содержатся в одной из приоритетных научно-исследовательских программ Научного комитета по исследованию Антарктики (SCAR) «Подледниковые озёра Антарктиды» (Subglacial Antarctic Lake Environments, SALE), в соответствии с которой велись исследования с 2000 по 2010 г. Обмен мнениями и многочисленные обсуждения получаемых научных данных позволили экспертам этой программы сделать вывод, что жизнь в подледниковых озёрах может быть уникальной. Именно поэтому любые прямые попытки отбора воды или осадков должны исключить возможность загрязнения, особенно органическими источниками углерода, способными заметно изменить водную экосистему [23, 31]. Однако программа SALE была сосредоточена в основном на развитии научного плана исследований подледниковых сред и принципы экологического сопровождения в рамках этой программы практически не получили дальнейшего развития.

Доклад Комитета по разработке принципов экологического сопровождения изучения подледниковых озёр (Committee on the Principles of Environmental and Scientific Stewardship for the Exploration and Study of Subglacial Environments) Национальных Академий США. В 2006 г. в Гренобле состоялся представительный международный семинар, на котором обсуждались технологии бурения ледников и проникновения в подледниковую среду с целью отбора проб на анализы и мониторинга подледниковых озёр. Несмотря на то, что основные принципы экологического сопровождения были сформулированы в Протоколе по охране окружающей среды, в 2006 г. не существовало чётких протоколов и стандартов для оценки, предотвращения и уменьшения возможного загрязнения подледниковой среды. В связи с этим Комитет Национальных Академий США проявил инициативу по созданию и разработке ряда научных и экологических стандартов с целью ответственного исследования уникальных подледниковых местообитаний и их защиты. Особое внимание уделялось: 1) определению уровней чистоты оборудования и приборов, погружаемых в подледниковые озёра; 2) разработке чёткой научной основы для выработки стандартов загрязнения; 3) рекомендациям по дальнейшей разработке общей стратегии исследований. В задачи Комитета входили также оценка потенциала существующих технологий и научной эффектив-

ности безотлагательных прямых исследований. В работе Комитета участвовали американские и международные эксперты, которые обобщили всю возможную информацию, полученную к 2007 г. от научного сообщества. Внешнюю оценку документа выполняли десять независимых международных экспертов [41].

Наиболее детально в докладе обсуждался вопрос о наличии и количестве микробных клеток в подледниковых системах, что было связано с существующими противоречиями в опубликованных данных [8, 12, 14, 30]. Основные направления исследований в этой области включали в себя: идентификацию жизни и изучение её разнообразия; исследование природы электронных доноров и акцепторов, которые могут поддерживать жизнь (если она существует); определение экологических и биогеохимических свойств подледниковых систем [41]. При этом отмечалось, что утверждение об отсутствии жизни в этих системах нельзя основывать на анализе единичных образцов. Подобный вывод возможен только на основе изучения большого числа образцов, многократно отобранных и проанализированных в разных лабораториях. В докладе сделано заключение, что для дальнейшего познания подледниковой среды Антарктиды требуются исследования, которые предполагают проникновение в подледниковые водоёмы. При этом подчёркивалось, что при отсутствии тщательного и осторожного отбора проб экологическая целостность и научная ценность этих местообитаний могут быть поставлены под угрозу. Таким образом, исследования подледниковых озёр должны развиваться по согласованным экологическим протоколам [41].

Кодекс проведения исследований подледниковых водоёмов. Вслед за публикацией доклада Комитета Национальных Академий США, Научный комитет по исследованию Антарктики (SCAR) на своём 30-м съезде в 2008 г. принял решение о создании группы экспертов по выработке Кодекса проведения исследований подледниковых водоёмов. Данный кодекс был представлен в июле 2011 г. на 34-й консультативной встрече по Договору об Антарктике (Кодекс проведения исследований и изучения подледниковых водных местообитаний – Code of conduct for the exploration and research of subglacial aquatic environments) [17]. Основой для разработки Кодекса послужили доклад Комитета Национальных Академий США и научные отчёты по программе SALE.

К основополагающим принципам Кодекса относятся: 1) сведение до минимума возможного изменения и загрязнения подледниковых местообитаний и сохранение их научных и экологических ценностей для будущих поколений; 2) обязательность прохождения процедуры оценки экологического воздействия проектов; 3) международный характер проектов по исследованию подледниковых экосистем; 4) консервативный, пошаговый подход; 5) свободное распространение научных данных и накопленного опыта; 6) сохранность и до-

ступность отчётов для всех последующих попыток отбора подледниковых проб.

Особое внимание в Кодексе уделено технологиям бурения и проникновения в подледниковые антарктические местообитания. Отмечено, что при бурении основания антарктического ледникового щита необходимо предусматривать возможность существования под ледником жидкой воды, которая представляет собой часть подледниковой дренажной системы и требует высокого уровня экологической защиты. Кроме того, подледниковые водные местообитания содержат живые организмы, поэтому должны быть приняты все меры предосторожности против любых изменений биологических или экологических свойств этих систем (включая введение чужеродных видов). Заливочные жидкости и оборудование, используемые для проникновения в подледниковые водные среды, необходимо очистить до реальной и приемлемой степени, т.е. они не должны содержать микробных клеток больше, чем их присутствует в эквивалентном объёме льда, через который происходит проникновение. Этот временный стандарт, установленный Кодексом, будет пересмотрен после получения новых данных о подледниковых микробных популяциях. Общее количество любого добавленного загрязнителя не должно изменить измеряемые химические свойства среды. Кодексом рекомендована оценка гидравлического давления и парциального давления газов в озёрах до начала бурения во избежание нисходящего загрязнения или дестабилизации газовых гидратов. Рекомендованы меры, необходимые для предотвращения потенциально возможного выброса заливочной жидкости через устье скважины. Методы отбора проб должны обеспечивать наиболее эффективное (мультидисциплинарное) использование образцов и сводить к минимуму разрушение химической и физической структуры подледниковых озёр.

Существующая редакция Кодекса – не окончательная. С появлением новых данных по воздействию на экологию изучаемых объектов документ будет модифицироваться и совершенствоваться. Отметим, что Кодексы SCAR – это только руководства, не имеющие обязательной силы, но следование им рассматривается участниками Договора об Антарктике как проявление «хорошего тона» в планировании и проведении антарктических исследований.

Проекты проникновения в подледниковые водные местообитания

В настоящее время известны три проекта исследования подледниковых водоёмов Антарктиды – российский проект проникновения и отбора проб оз. Восток, проект Великобритании по исследованию оз. Эллсуорт (Ellsworth) и американский проект по проникновению и отбору проб под ледниковым потоком Вильянс (Whillans Ice Stream) в Западной Антарктиде (рис. 1).

Проект по исследованию и изучению озера Восток.

Российский проект был и остаётся наиболее известным из всех проектов исследования подледниковых водных местообитаний. Это объясняется и долгой историей изучения ледника над озером, и уникальностью самого озера [4]. Оз. Восток среди других подледниковых водоёмов Антарктиды выделяется значительными размерами (60×260 км) и объёмом содержащейся в нём воды (около 6000 км^3). Средняя глубина озера – 400 м, при этом мощность водного слоя в южной части водоёма достигает 1200 м. Мощность ледника над водной поверхностью изменяется от 3600 до 4350 м. Мощность осадков в озере, по-видимому, составляет 100–300 м [3], хотя эти оценки требуют дальнейшего уточнения. Период полного обновления воды в озере может достигать 100 тыс. лет; в течение, по крайней мере, последних 40 тыс. лет водообмен между озером и перекрывающим его ледником проходил в условиях, близких к равновесным [4, 5].

Предложенная специалистами Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (СПГГИ) и Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) технология первого проникновения в оз. Восток достаточно проста и сводит к минимуму риск загрязнения уникального водоёма. Она заключается в заборе подледниковой воды в скважину путём создания отрицательной разности давлений буровой жидкости и озёрной воды. После замерзания воды в скважине планируется провести повторное бурение с отбором керна замёрзшей озёрной воды до отметки 15–20 м от поверхности озера. Разработанная технология предполагала использование теплового снаряда для бурения последних 10–15 м льда и создание буферного слоя между буровой жидкостью и поверхностью озера [43]. В качестве буферного слоя предполагалось использовать кремний-органическую жидкость. Первое проникновение в оз. Восток состоялось 5 февраля 2012 г. по сценарию, приведённому в работе [1]. Повторное бурение скважины будет начато в летний антарктический сезон 2012/13 г.

Прямые измерения водной толщи планируется начать в 2014–2015 гг. после второго проникновения в оз. Восток. Пробоотборные и измерительные модули будут доставляться к поверхности озера с помощью специального доставочного снаряда. При достижении поверхности озера спуск снаряда прекратится и из него в озеро будет опущен только измерительный модуль. Для исключения контакта измерительного модуля с заливной и буферной жидкостями нижняя часть скважины должна быть заполнена озёрной водой на высоту, примерно равную длине доставочного снаряда.

Технология прямых исследований оз. Восток, а также измерительные и пробоотборные комплексы, с помощью которых они будут выполняться, находятся в стадии разработки [24]. Планируется, что модули будут стерилизованы с помощью гамма-излучения до отправ-

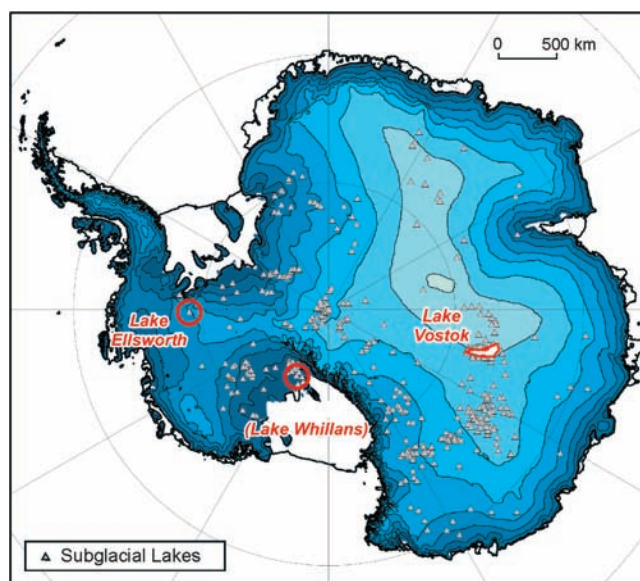


Рис. 1. Местоположение 386 антарктических подледниковых озёр [41].

Подледниковые озера отмечены треугольниками. Выделены озера Эллсуорт (Lake Ellsworth), Восток (Lake Vostok) и Вильянс (Lake Whillans); воспроизведено из [35] с разрешения М. Зигерта **Fig. 1.** The location of 386 Antarctic subglacial lakes [from 41]. Lake Ellsworth, Lake Vostok, and Lake Whillans are annotated; reproduced from [35], courtesy of Martin Siegart

ки в Антарктиду, а затем, непосредственно на станции Восток, дополнительно обработаны озоном [24]. Отобранные пробы будут переливаться в специальные контейнеры без контакта с окружающей средой в условиях, отвечающих чистым помещениям класса 1000 (ISO 6). Такая лаборатория для работы с измерительными и пробоотборными модулями будет создана на станции Восток до начала прямых исследований озера. Положительные результаты работ по этому проекту позволят получить ответы на наиболее важные вопросы, касающиеся существования жизни в оз. Восток и гидрологического режима этого уникального водоёма.

Однако, наряду с интересом, российский проект вызывает озабоченность научной общественности [21]. Это связано, в основном, с разработанной технологией проникновения в озеро и его прямым исследованием с помощью уже пробуренной глубокой скважины 5Г, при бурении которой в качестве заливной жидкости применялась смесь авиационного керосина и фреона, не замерзающая при сверхнизких температурах на станции Восток [43]. Отметим, что использовать метод бурения горячей водой на станции Восток невозможно по нескольким причинам, но главным образом из-за суровых условий на станции, расположенной в глубине материка. Так, средняя температура воздуха на станции Восток составляет $-55 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура ледника на поверхности $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ (для сравнения – в районе оз. Эллсу-

орт эти температуры равны соответственно -24 и -32 °С). Имеет значение и глубина скважины (более 3700 м), на всём протяжении которой, особенно в верхней части, необходимо поддерживать высокую температуру. Это требует громадного расхода энергии [16], что невозможно в условиях станции Восток с экономической и экологической точек зрения.

Проект ELLSWORTH. Британский проект по изучению оз. Элсуорт (<http://www.ellsworth.org.uk>) содержит наиболее разработанную систему подготовки оборудования и контроля его чистоты. Подходы к экологическому сопровождению этого проекта детально изложены в литературе [27, 37, 38]. Окончательный вариант Всесторонней оценки воздействия на окружающую среду проекта исследования оз. Элсуорт представлен на 35-м Консультативном совещании по Договору об Антарктике (КСДА) в июне 2012 г. [19].

Оз. Элсуорт, открытое еще в 1970-е годы, имеет размеры $14,7 \times 3,1$ км и объём воды $1,37$ км³. Оно находится на глубине 2,9–3,3 км от поверхности ледникового покрова. Мощность водного слоя изменяется в пределах 52–156 м [44], мощность рыхлых осадков не превышает 2 м [38]. Период полного водообмена оценивается примерно в 2,4 тыс. лет. По имеющимся данным, озеро достаточно стабильно, хотя не исключено, что оно может представлять собой открытую гидрологическую систему [38]. Проект проникновения и исследования оз. Элсуорт предусматривает использование при бурении скважины горячей воды, последовательное развёртывание измерительно-пробоотборного зонда и бура для осадочных пород с целью измерения физических и химических параметров *in situ*, отбора проб воды и осадков в летний сезон 2012/13 г. По подсчётам, бурение ледникового покрова и отбор проб должны занять четыре дня; на установку необходимого оборудования в месте бурения и его последующее удаление потребуется несколько месяцев. По мнению участников проекта, методы и протоколы, разработанные для изучения оз. Элсуорт, позволят получить максимальную научную отдачу без заметного воздействия на окружающую среду [38]. При разработке проекта учтены рекомендации доклада Комитета Национальных Академий США и Кодекса проведения исследований подледниковых водоёмов SCAR.

Точка бурения выбрана над самым глубоким местом озера, где мощность льда достигает 3155 м [38]. Горячая вода, используемая при бурении, будет проходить через специальные фильтры и обрабатываться ультрафиолетовым (УФ) облучением. Во время бурения скорость подачи потока воды (3 л/с), её температура (90 °С, что соответствует процессу пастеризации) и давление ($13,8 \times 10^6$ Па) будут постоянны. Скорость бурения будет изменяться от 1,0 до 0,5 м/мин для получения одинакового диаметра (36 см) по всей глубине скважины. Система фильтрации предусматривает

пять ступеней фильтров с размерами пор 20, 5, 1, 0,45 и 0,2 мкм, которые вода проходит до УФ облучения. Перед началом бурения 3,4 км шланга на лебёдке и сопло будут выдерживаться при температуре 90 °С, по крайней мере, 15 часов, что позволит получить необходимую чистоту. Подсчитано, что за время бурения через шланги и сопла бурового снаряда пройдёт 800 т горячей отфильтрованной воды. Наружная поверхность шланга будет очищена струями воды под высоким давлением и перед погружением в скважину последовательно пройдёт через хомут с УФ облучением. На каждой ступени фильтрации и УФ облучения предусмотрены точки отбора проб для анализа. Все фильтры будут дублированы, что обеспечит непрерывный поток горячей воды при их смене в зависимости от показаний дифференциального давления [38]. Рассчитано, что скорость замерзания скважины после вскрытия озера составит 0,6 см/ч, что позволит в течение 24 ч иметь диаметр скважины, достаточный для погружения и подъёма оборудования.

В проекте проведена скрупулёзная качественная и количественная оценка потенциальных экологических воздействий на подледниковую среду и возможных путей их смягчения. Признано, что для данного проекта внесение посторонних микроорганизмов – основной экологический риск. В связи с этим особое внимание уделяется микробиологической чистоте оборудования, которое будет контактировать с подледниковой водной средой. Погружаемое в скважину оборудование будет подготовлено и собрано в специальной лаборатории (класс 100 000, ISO 8), стерилизовано в зависимости от материала и конструкции автоклавированием, парами перекиси водорода, УФ облучением, химическими дезинфицирующими агентами, упаковано в специальные стерильные герметичные контейнеры и доставлено на место бурения в защитных боксах [38]. Основные задачи проекта ELLSWORTH – обнаружение жизни в озере, исследование её происхождения, эволюции и условий поддержания, а также изучение палеоклиматической и гляциологической истории Западно-Антарктического ледникового покрова.

Проект WISSARD. Шестилетний проект WISSARD (The Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling, WISSARD; <http://www.wissard.org>) предусматривает проведение в 2009–2015 гг. комплексных исследований непрерывной гидрологической системы под Западно-Антарктическим ледяным потоком (выводной ледник) Вильянс. Работы будут вести в рамках трёх взаимосвязанных подпроектов:

Геомикробиология антарктических подледниковых местообитаний (Geomicrobiology of Antarctic Subglacial Environments, GBASE);

Бурение скважины доступа к озеру, расположенному под ледяным потоком (Lake and Ice Stream Subglacial Access Research Drilling, LISSARD);

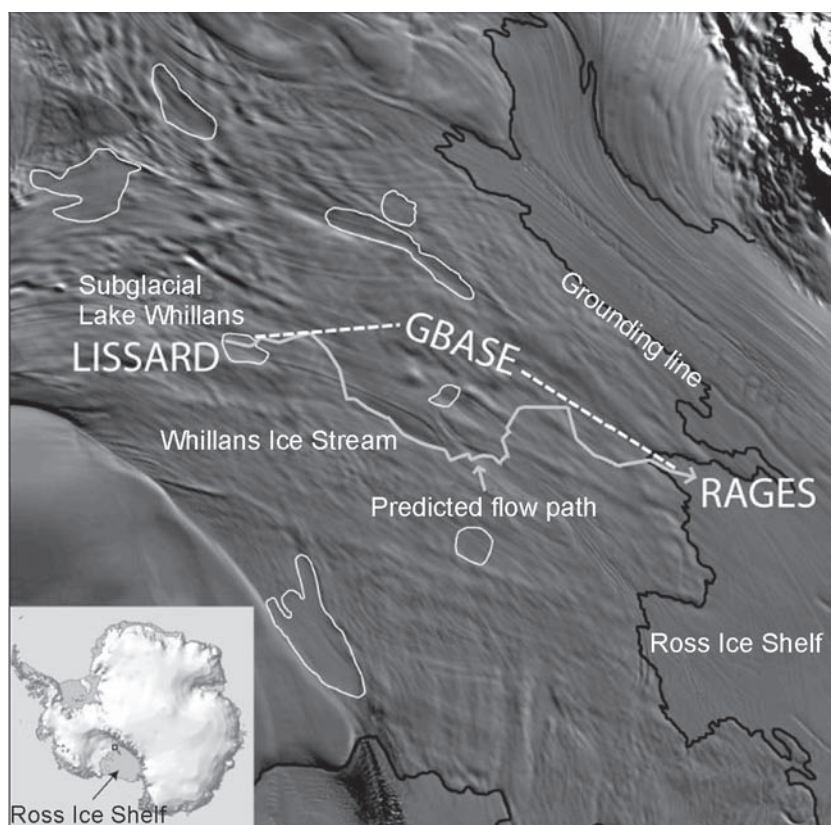


Рис. 2. Карта гидрологической системы ледникового потока Вильянс с показанной линией тока подледниковой воды от оз. Вильянс к линии налегания ледника. Показаны районы проведения исследований в рамках подпроектов LISSARD, GBASE и RAGES основного проекта WISSARD (см. текст). Белые контуры – береговые линии подледниковых озёр. Карта вставки показывает положение выводного ледника Вильянс относительно шельфового ледника Росса и антарктического материка (воспроизведено из [29] с разрешения Джона Прискью).

Whillans Ice Stream – ледниковый поток Вильянс; Predicted flow path – предполагаемая линия тока; Subglacial Lake Whillans – подледниковое оз. Вильянс; Ross Ice Shelf – шельфовый ледник Росса

Fig. 2. Map of the Whillans Ice stream subglacial hydrologic system with annotation of the predicted flow path of subglacial water from subglacial Lake Whillans to the grounding line. Marked are the geographical study areas for LISSARD, GBASE and RAGES components of the WISSARD project. The white outlines indicate the locations of subglacial lakes. Inset map shows the location of Whillans Ice Stream with respect to the Ross Ice Shelf and Antarctic continent [reproduced from 29, courtesy of John Priscu]

Роботизированное исследование зоны налегания шельфового ледника (Robotic Access to Grounding-zones for Exploration and Science, RAGES) (рис. 2) [20, 32].

Озеро Вильянс – активный подледниковый водоём, часть разветвлённой гидрологической системы, которая существует под ледяным потоком Вильянс. За шесть лет (с 2003 по 2009 г.) зафиксировано два полных цикла заполнения–дренажа озера с периодичностью приблизительно три года. Размер озера – наименьший из всех рассматриваемых. Его площадь оценивается в 59 ± 12 км², объём воды – менее 0,5 км³, глубина порядка 8 м, мощность ледника над поверхностью воды – около 700 м [32]. Подсчитано, что период полного водообмена составляет примерно 10 лет, при этом во время дренажа объём сбрасываемой воды равен 0,15 км³ [26]. Данных об осадках нет. Озеро выбрано для изучения ввиду своего расположения под основным ледяным потоком, из-за его близости к зоне налегания ледника (100 км), малой мощности льда и близости к станции Мак-Мёрдо. Проникновение в озеро намечено на сезон 2013/14 г. с помощью системы бурения горячей водой, созданной компанией Caltech. Эта система применялась для бурения 119 скважин вдоль ледяных потоков Западной Антарктиды до глубины 1300 м, а также для бурения глубоких (до 2450 м) скважин в рамках проекта IceCube на Южном Полюсе (www.icecube.wisc.edu).

Система горячего бурения, как и в проекте изучения оз. Элсуорт, будет содержать элементы подготовки и обработки большого объёма воды методами микрофильтрации и УФ облучения с целью удаления микробных клеток и органического углерода из горячей воды, циркулирующей в скважине. Ожидается, что буровая установка позволит пробурить скважину диаметром 20 см, которая будет доступна для выполнения исследований в течение восьми дней. Инструменты и пробоотборные устройства, погружаемые в скважину, будут очищены дезинфицирующим раствором перекиси водорода или гипохлорита. Клетки, содержащие ДНК, будут идентифицироваться методами прямого подсчёта и молекулярного анализа с целью определения микрофлоры, присутствующей в исходной воде, и оценки возникающего в процессе бурения загрязнения. Чистота воды и инструментов будет контролироваться представителем Офиса полярных программ Национального научного фонда (NSF) США, ответственного за охрану окружающей среды [20].

До начала реализации проекта для подтверждения эффективности очистки воды и оборудования планировалось провести два испытания предложенной технологии. Первое испытание систем фильтрации и УФ облучения уже выполнено в лабораторных условиях [26]. Испытания системы фильтрации, содержащей фильтры с размером пор 0,2 и 2 мкм, показали эффективное удаление 99,8% микрочастиц диаметром 1–5 мкм. С помощью

Таблица 1. Возможные риски при проникновении в подледниковые антарктические водоёмы^{1*}

Риск	Норма допустимого воздействия	Проекты		
		Восток	Эллсуорт	Вильянс
Биологическое загрязнение	24–100 клеток/мл ^{2*}	+	+	+
Химическое загрязнение	РОУ менее 10 ppbC ^{3*}	+	–	–
Дестабилизация газовых гидратов	Давление не ниже давления диссоциации гидратов	+	+	–
Тепловое загрязнение	Изменение температуры водоёма в месте исследования не более чем на 0,001 °C ^{4*}	–	+	+

^{1*}(+), (–) – соответственно наличие или отсутствие риска; ^{2*}содержание микробных клеток в керне озёрного льда со станции Восток по данным [10, 14]; ^{3*}растворимый органический углерод во льду антарктических кернов [26]; ^{4*}оценка по данным [5].

фильтров 2 мкм результативно удаляли также 97,5% илистых и глинистых частиц. За 15 часов система позволила снизить концентрацию илистых частиц более чем на три порядка. Обработка раствора, содержащего клетки *Escherichia coli*, УФ облучением с длиной волны 185 и 254 нм при скоростях потока 18–300 л/мин (реально ожидаемая средняя скорость циркуляции воды в системе – 95–130 л/мин) понижала концентрацию живых клеток на четыре порядка, практически до пороговой чувствительности используемых методов. Эффективность систем фильтрации и УФ облучения проверялась при очистке воды из естественного водоёма. Так, процесс пастеризации (нагрев воды до 85 °C в течение двух минут) снижал концентрацию живых клеток на два порядка. В целом, при испытаниях, система фильтрации позволила уменьшить количество живых клеток на четыре порядка, а 99,99% оставшихся клеток были убиты в результате УФ облучения и пастеризации [26]. Полевые испытания буровой установки и системы очистки планируются провести в ноябре–декабре 2012 г. на шельфовом леднике Росса вблизи станции Мак-Мёрдо.

Озабоченность возможным биологическим загрязнением оз. Вильянс смягчается тем фактом, что оно достаточно мало и находится практически в конце гидрологической дренажной системы, направленной в сторону моря. Поэтому любое потенциальное экологическое воздействие здесь будет ограничено узкой областью вблизи океана и относительно коротким временем, что подтверждается данными спутниковой лазерной альтиметрии (ICESat) [20]. Проект изучения подледникового оз. Вильянс направлен на решение двух основных задач – определение роли выводных ледников Западной Антарктиды в глобальном повышении уровня Мирового океана, а также выявление микроорганизмов и их местообитаний в подледниковых водных экосистемах.

Таким образом, все три проекта нацелены, прежде всего, на поиски микробных сообществ и изучение их структуры в экстремальных условиях подледниковых озёр, характеризующихся низкими температурами, отсутствием света и скорее всего низким содержанием органических веществ. Поэтому общим риском для всех трёх проектов следует считать возможное биологическое

загрязнение исследуемых объектов, в то время как остальные риски зависят от используемой технологии проникновения в подледниковую среду и особенностей изучаемых водоёмов (табл. 1).

Программа экологического сопровождения прямых исследований подледникового озера Восток

5 февраля 2012 г. глубокая скважина 5Г-2 достигла поверхности оз. Восток на отметке 3769,3 м [1]. Этому событию предшествовала Рекомендация SCAR о приостановлении бурения на безопасной глубине до разработки экологически чистой технологии проникновения (1998 г.), разработка самой технологии (1999–2000 гг.), прохождение Государственной экологической экспертизы РФ (2001 г.), многочисленные дискуссии на международных и национальных совещаниях различного уровня (1998–2010 гг.) и подготовка Всесторонней оценки воздействия на окружающую среду, заключительная версия которой была представлена в 2010 г. на 33-м КСДА [6, 24]. Все эти мероприятия были направлены на снижение до минимума возможных негативных экологических последствий, связанных с проникновением в подледниковое оз. Восток.

Первое вскрытие озера состоялось без серьёзных осложнений: вода вошла в скважину под давлением около $3,5 \times 10^5$ Па, подъём воды и заливочной жидкости в скважине привёл к заполнению свободного участка обсадной колонны и истечению 1,5–2,5 м³ заливочной жидкости из устья скважины [1]. Через 2 часа после проникновения буровой снаряд, покрытый слоем замёрзшей озёрной воды, подняли на поверхность (рис. 3). И хотя сценарий, по которому произошло первое вскрытие озера, несколько отличался от технологии, заявленной во Всесторонней оценке воздействия на окружающую среду (не был создан буферный слой кремний-органической жидкости, использовался штатный электромеханический буровой снаряд вместо специального теплового снаряда), по заключению российских учёных, он исключил попадание в озеро даже незначительного количества буровой жидкости [1].

Как уже отмечалось, основная экологическая проблема, связанная с реализацией проекта проникнове-

ния в оз. Восток, — потенциально возможное биологическое и химическое загрязнение крупнейшего на планете подледникового водоёма заливочной жидкостью, которой заполнена скважина. Состав заливочной жидкости скважины 5Г представляет собой сложную смесь в основном насыщенных углеводородов с длиной цепи от 9 до 16 атомов углерода (разные типы авиакеросинов ТС-1, JET-A и т.д.) и гидрохлорфторуглеродов (фреонов 11 и F-141b) в соотношении в среднем 5:1. Авиакеросины могут содержать также разветвлённые и ароматические углеводороды и нафталены, а фреон — фтордихлорэтан [7]. В жидкости возможны также примеси этиленгликоля, использовавшегося для ликвидации буровых аварий в скважине. На забое скважины могли также образоваться клатратные гидраты, содержащие фреон [28]. При анализе проб заливочной жидкости хроматографическими и масс-спектрометрическими методами установлено наличие таких циклических ароматических углеводородов как толуэн, ксилен, нафтаген, флуорен и фенантрен [неопубликованные данные]. Изучение биологического состава заливочной жидкости скважины 5Г показало, что концентрация микробных клеток в нижних, относительно тёплых горизонтах скважины ($-6 \div -10$ °С) составляет около 100 клеток/мл. Двумя доминантными фило типами, обнаруженными на дне скважины в заливочной жидкости, были представители рода *Sphingomonas* — хемоорганотрофных бактерий, способных к деградации широкого спектра замещённых ароматических соединений, в том числе и в холодных условиях [7].

По результатам изучения химического состава озёрного льда мы знаем, что содержание растворённого углерода в озёрном льду, не содержащем минеральные частицы, не превышает 10 ppb [29], а общее содержание ионов (65 ppb) в несколько раз ниже, чем в атмосферном льду [18]. С биологической точки зрения, озёрный лёд — в целом исключительно чистый: фактически он не содержит микроорганизмов (бактерий) и характеризуется очень малой и неравномерно распределённой биомассой. Так, измеренные клеточные концентрации микроорганизмов в озёрном льду до отметки 3659 м не превышают 12 клеток/мл, что близко к уровню привнесённого загрязнения [10]. Все это косвенно свидетельствует, что и вода озера (по крайней мере, её поверхностный слой) должна характеризоваться очень бедным микробным сообществом и низкой концентрацией химических примесей. Трудно предположить, что может произойти с бактериями, обнаруженными в заливочной жидкости, при их попадании в озеро. С одной стороны, температура озера (около $-2,6$ °С) вполне пригодна для их жизни и метаболизма. С другой стороны, ожидается, что озёрная вода насыщена растворённым кислородом (до 0,8 г/л) [4, 5], а это губительно для микроорганизмов и, следовательно, может негативно повлиять на развитие жизни в озере [8]. Судьбу углеводородов, их распределение в объёме озера и



Рис. 3. Отбор пробы озерной воды, замёрзшей на коронке бурового снаряда во время его подъёма на поверхность после вскрытия оз. Восток

Fig. 3. Sampling of subglacial Lake Vostok surface layer water, frozen on a way of the drill rising to the borehole top

то, как будет происходить окисление углеводородов в зависимости от давления, температуры и реального количества растворённого кислорода, мы не берёмся предсказывать. Заметим, что если бы вся заливочная жидкость из скважины (около 60 м³) попала в озеро и перемешалась с озёрной водой (объём 6100 км³), то расчётная концентрация углеводородов (приблизительно 1×10^{-5} мг/л в пересчёте на керосин) была бы значительно меньше их предельно допустимой концентрации (ПДК) в воде объектов хозяйственно-питьевого водопользования (0,01 мг/л). Тем не менее, развитие событий по такому фантастическому сценарию рассматривалось бы как экологическая катастрофа, недопустимая с точки зрения этических принципов, лежащих в основе Протокола об охране окружающей среды Антарктики и Кодекса проведения исследований подледниковых водоёмов.

В соответствии с рекомендациями Кодекса мы разработали программу экологического сопровождения первого проникновения в оз. Восток. Для оценки возможного биологического загрязнения необходимо знать концентрацию микроорганизмов в нижних слоях озёрного льда и в озёрной воде, а также их концентрацию в заливочной жидкости на дне скважины. Согласно принятым в Кодексе стандартам, оценка возможного химического загрязнения основывается на данных о химическом составе нижних слоёв озёрного льда (воды), а также составе заливочной жидкости и бурового шлама на дне скважины с учётом возможного вто-

Таблица 2. Образцы, отобранные для исследований по программе экологического сопровождения первого проникновения в подледниковое оз. Восток

Образец	Дата отбора	Глубина по керну, м	Задача исследований
Заливочная жидкость	18.12.2011	3630	Оценка возможного биологического и химического загрязнения
Шлам	29.12.2011	3720	
	30.12.2011	3722	
	06.02.2012	3766	
Ледяной керн	06.02.2012	3765	Оценка клеточных концентраций и химического состава льда
Замёрзшая вода	06.02.2012	3769	Оценка клеточных концентраций и химического состава воды озера
Поверхностный снег (контрольный образец)	01.2012	2–5 км от станции Восток	Отработка методов и оценка пределов чувствительности

ричного загрязнения в процессе отбора проб и чувствительности используемого аналитического оборудования. В соответствии с этими принципами в сезонный период 57-й РАЭ, параллельно с буровыми работами по проникновению в оз. Восток, мы проводили отбор заливочной жидкости и шлама со дна скважины 5Г-2, а также образцов керна из нижних слоёв ледника и проб озёрной воды, замёрзшей на коронке снаряда в результате вскрытия озера (см. табл. 2 и рис. 3). Для всех образцов планируется установить химический состав и оценить клеточные концентрации микроорганизмов и их биоразнообразие, что позволит выбрать индикаторы возможного загрязнения, определить их количественные показатели и установить допустимые значения. Поверхностный снег, собранный на расстоянии 2–5 км от станции Восток, будет служить контрольным (чистым) образцом, а также материалом для создания искусственного ледяного керна, на котором будут отрабатываться методы исследований и оцениваться пределы чувствительности анализов с учётом реальных характеристик заливочной жидкости и шлама.

К методическим проблемам, которые необходимо решить на первом этапе реализации программы, относятся подбор оптимального протокола экстракции микробных клеток и ДНК из заливочной жидкости и шлама, а также выбор методики для микроскопии этих же образцов. В связи с ультранизкими концентрациями химических и биологических примесей в образцах озёрного льда и воды подготовка этих проб на соответствующие анализы будет проводиться в чистых помещениях класса 10 000 (ISO 7), использование которых необходимо для минимизации загрязнения проб [10, 18, 29]. На втором этапе мы планируем изучить керн замёрзшей в скважине озёрной воды, который будет получен в результате повторного разбуривания скважины в сезонный период 58-й РАЭ. Образцы керна, отобранные с разных глубин, позволят нам подсчитать вклад основных химических и биологических источников контаминации, определённых на первом этапе, в изменение первичных свойств замёрзшей в скважине воды и оценить протяжённость участка скважины (столба подняв-

шейся воды), подвергшейся загрязнению при первом вскрытии озера. Ожидается, что верхний слой замёрзшей воды будет наиболее загрязнённым, но с глубиной загрязнение будет снижаться. Это предположение основано на опыте проекта глубокого бурения в Северной Гренландии (проект NGRIP). Здесь подледниковая вода, вскрытая скважиной, поднялась по стволу на 45 м от дна ледника. Исследования керна замёрзшей воды показали уменьшение концентрации следов заливочной жидкости с увеличением глубины отбора керна [9, 15]. Загрязнение подледниковой воды, вероятнее всего, происходило во время её подъёма по стволу скважины, сопровождавшегося интенсивным перемешиванием с заливочной жидкостью и образованием эмульсии. До повторного проникновения в подледниковое оз. Восток и начала прямых исследований его водной толщи предстоит решить непростые задачи по совершенствованию технологии прямого, а главное — чистого доступа к озеру, разработке протоколов обработки и доставки к месту бурения практически стерильного пробоотборного и измерительного оборудования.

Заключение

На основе анализа существующих документов и рекомендаций разработаны общие принципы и программа экологического сопровождения исследований подледникового оз. Восток. Изучение образцов заливочной жидкости и бурового шлама, а также керна озёрного льда и первых проб (замёрзшей) озёрной воды позволит оценить возможное биологическое и химическое загрязнение в результате первого вскрытия озера и откорректировать дальнейшую программу экологического сопровождения повторного проникновения и прямых исследований водной толщи подледникового озера Восток.

Три проекта исследования и изучения подледниковых водных местообитаний должны в скором времени дать ответы на многие интересующие учёных вопросы. Выбранные для исследований объекты — озера Восток, Элсуорт и Вильянс — настолько различны по структуре, возрасту и гидрологическому режиму, что только синтез

данных, полученных при реализации всех трёх программ, поможет составить правильное представление о подледниковой водной экосистеме Антарктиды. Подходы к прямым исследованиям, разработанные и кажущиеся оптимальными для одного проекта, не всегда применимы в других проектах. Вместе с тем качество и уровень экологического сопровождения проектов будут во многом зависеть от сотрудничества и обмена информацией между участниками всех проектов. Именно в условиях международного обмена можно будет добиться максимального научного эффекта при минимальном негативном воздействии на исследуемые объекты.

Работа выполнена в рамках Проекта 2 подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан» при финансовой поддержке РФФИ, грант 12-05-00851.

Литература

1. Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 12–20.
2. Зотилов И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток (Антарктида) // ДАН. 2000. Т. 374. С. 824–826.
3. Лейченко Г.Л., Попков А.М. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 21–30.
4. Липенков В.Я., Шибаяв Ю.А., Саламатин А.Н., Екайкин А.А., Вострецов Р.Н., Преображенская А.В. Современные климатические изменения, зарегистрированные в вариациях температуры верхнего 80-метрового слоя ледниковой толщи на станции Восток // МГИ. 2004. Вып. 97. С. 44–56.
5. Липенков В.Я., Лукин В.В., Булат С.А., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Лейченко Г.Л., Масолов В.Н., Попов С.В., Саватюгин Л.М., Саламатин А.Н., Шибаяв Ю.А. Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПП // Вклад России в Междун. полярный год 2007/08: Полярная криосфера и воды суши. / Ред. В.М. Котляков М.: Paulsen, 2011. С. 17–45.
6. Лукин В.В. У порога неизведанного // Российские полярные исследования. 2011. № 4. С. 18–23.
7. Alekhina I.A., Marie D., Petit J.-R., Lukin V.V., Zubkov V.M., Bulat S.A. 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.
8. Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.R., de Angelis M., Wagenbach D., Lipenkov V.Y., Vasilyeva L.P., Wloch D.M., Raynaud D., Lukin V.V. DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: Implications for searching for life in extreme icy environments // Intern. Journ. of Astrobiology. 2004. V. 3. P. 1–12.
9. Bulat S., Alekhina I., Petit J.R., Steffensen J.P., Dahl-Jensen D. Bacteria and archaea under Greenland Ice Sheet: NGRIP 'red' ice issue // Geophys. Research Abstracts. 2005. V. 7. Abstract 05298.
10. Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Y., Lukin V.V., Marie D., Petit J.R. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica // Microbiology. 2009. V. 78. P. 808–810.
11. Bulat S.A., Alekhina I.A., Marie D., Martins J., Petit J.R. Searching for life in extreme environments relevant to Jovian's Europa: Lessons from subglacial ice studies at Lake Vostok (East Antarctica) // Advances in Space Research. 2011. V. 48. P. 697–701.
12. Christner B.C., Mosley-Thompson E., Thompson L.G., Reeve J.N. Isolation of bacteria and 16S rDNAs from Lake Vostok accretion ice // Environ. Microbiology. 2001. V. 3. P. 570–577.
13. Christner B.C., Mikucki J.A., Foreman C.M., Denson J., Priscu J.C. Glacial ice cores: A model system for developing extraterrestrial decontamination protocols // Icarus. 2005. V. 174. P. 572–584.
14. Christner B.C., Royston-Bishop G., Foreman C.M., Arnold B.R., Tranter M., Welch K.A., Lyons W.B., Tsapin A.I., Priscu J.C. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica // Limnology and Oceanography. 2006. V. 51. P. 2485–2501.
15. Christner B.C., Montross G.G., Priscu J.C. Dissolved gases in frozen basal water from the NGRIP borehole: implications for biogeochemical processes beneath the Greenland Ice Sheet // Polar Biology. 2012. doi:10.1007/s00300-012-1198-z.
16. Clow G.D., Koci B. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology // Mem. Natl. Inst. Polar Research. 2002. V. 56. P. 5–37.
17. Code of conduct for the exploration and research of subglacial aquatic environments // ATCM IP 33. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting, Buenos Aires, 20 June – 1 July 2011.
18. De Angelis M., Petit J.R., Savarino J., Souchez R., Thieme M.H. Contributions of an ancient evaporitic-type reservoir to subglacial lake Vostok chemistry // EPSL. 2004. V. 222. P. 751–765.
19. Final Comprehensive Environmental Evaluation. Proposed Exploration of Subglacial Lake Ellsworth Antarctica. May 2012. 87 p.
20. Fricker H.A., Powell R., Priscu J., Tulaczyk S., Anandakrishnan S., Christner B., Holland D., Horgan H., Jacobel R., Mikucki J., Mitchell A., Scherer R., Severinghaus J. Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) project // Proc. of the Chapman Confer. on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. 2011. AGU, Washington, D.C., P. 199–220.
21. Giles J. Russian bid to drill Antarctic lake gets chilly response // Nature. 2004. V. 430. P. 494.
22. Jouzel J., Petit J.R., Souchez R., Barkov N.I., Lipenkov V.Y., Raynaud D., Stievenard M., Vassilev N.I., Verbeke V., Vimeux F. More than 200 meters of lake ice above subglacial lake Vostok, Antarctica // Science. 1999. V. 286. P. 2144–2147.
23. Kennicutt M., Petit J.R. Future directions in subglacial environments research // EOS (Transactions, AGU). 2007. V. 88. P. 129–131.
24. Lukin V., Bulat S. Vostok Subglacial Lake: Details of Russian plans/activities for drilling and sampling, in Antarctic subglacial aquatic environments // Proc. of the Chapman Confer. on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. 2011. AGU, Washington, D.C., P. 187–197.
25. Meltzer M. When biospheres collide: A history of NASA's planetary protection programs. Washington, D.C.: NASA Aeronautics and Space Administration, 2011. 542 p.
26. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream // ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting, Buenos Aires, 20 June – 1 July 2011.
27. Mowlem M.C., Tsaloglou M.N., Waugh E.M., Floquet C.F.A., Saw K., Fowler L., Brown R., Pearce D., Wyatt J.B., Beaton A.D., Bruto M.P., Hodgson D.A., Griffiths G., Bentley M., Blake D., Capper L., Clarke R., Cockell C., Corr H., Harris W., Hill C., Hindmarch R., King E., Lamb H., Maher B., Makinson K., Parnell J., Priscu J., Rivera A., Ross N., Siegert M.J., Smith A., Tait A., Tranter M., Wadham J., Whalley B., Woodward J. Probe technology for the direct measurement and sampling of

- Ellsworth subglacial lake in Antarctic Subglacial Aquatic Environments // Proc. of the Chapman Confer. on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. 2011. AGU, Washington, D.C., P. 159–186.
28. *Murshed M.M., Faria S.H., Kuhs W.F., Kipfstuhl S., Wilhelms F.* The role of hydrochlorofluorocarbon densifiers in the formation of clathrate hydrates in deep boreholes and subglacial environments // *Annals of Glaciology*. 2007. V. 47. P. 109–114.
 29. *Preunkert S., Legrand M., Stricker P., Bulat S., Alekhina I., Petit J.R., Hoffmann H., May B., Jourdain B.* Quantification of Dissolved Organic Carbon at very low levels in natural ice samples by a UV induced oxidation method // *Environ. Sci. Technologies*. 2011. V. 45. P. 673–678.
 30. *Priscu J.C., Adams E.E., Lyons W.B., Voytek M.A., Mogk D.W., Brown R.L., McKay C.P., Takaacs C.D., Welch K.A., Wolf C.F., Kirshstein J.D., Avci R.* Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica // *Science*. 1999. V. 286. P. 2141–2144.
 31. *Priscu J.C., Kennicutt M.C., Bell R.E., Bulat S.A., Ellis-Evans J.C., Lukin V.V., Petit J.R., Powell R.D., Siegert M.J., Tabacco I.* Exploring Subglacial Antarctic Lake Environments // *EOS (Transactions, AGU)*. 2005. V. 86. P. 193, 197.
 32. *Priscu J.C., Powell R.D., Tulaczyk S.* Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream // *EOS (Transactions, AGU)*. 2010. V. 91. P. 253–254.
 33. *Race M.* Policies for scientific exploration and environmental protection: Comparison of the antarctic and outer space treaties // *Science Diplomacy: Antarctica, Science and the Governance of International Spaces*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Scholarly Press, 2011. P. 143–152.
 34. *Randolph R.O., Race M.S., McKay C.P.* Reconsidering the theological and ethical implications of extraterrestrial life // *Center for theology and natural sciences (CTNS) Bulletin*. 1997. V. 17. P. 1–8.
 35. *Rummel J.D.* Planetary exploration in the time of astrobiology: Protecting against biological contamination // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2001. V. 98. P. 2128–2131.
 36. *Rummel J.D., Stabekis P.D., Devincenzi D.L., Barengoltz J.B.* COSPAR's planetary protection policy: A consolidated draft // *Adv. Space Research*. 2002. V. 30. P. 1567–1571.
 37. *Siegert M.J., Behar A., Bentley M., Blake D., Bowden S., Christoffersen P., Cockell C., Corr H., Cullen D.C., Edwards H., Ellery A., Ellis-Evans C., Griffiths G., Hindmarsh R., Hodgson D.A., King E., Lamb H., Lane L., Makinson K., Mowlem M., Parnell J., Pearce D.A., Priscu J., Rivera A., Sephton M.A., Sims M.R., Smith A.M., Tranter M., Wadham J.L., Wilson G., Woodward J.* The Lake Ellsworth Consortium. Exploration of Ellsworth Subglacial Lake: a concept paper on the development, organisation and execution of an experiment to explore, measure and sample the environment of a West Antarctic subglacial lake // *Rev. of Environ. Science and Biotechnology*. 2007. V. 6. P. 161–179.
 38. *Siegert M. J., Clarke R.J., Mowlem M., Ross N., Hill C.S., Tait A., Hodgson D., Parnell J., Tranter M., Pearce D., Bentley M.J., Cockell C., Tsaloglou M.N., Smith A., Woodward J., Brito M.P., Waugh E.* Clean access, measurement, and sampling of Ellsworth Subglacial Lake: A method for exploring deep Antarctic subglacial lake environments // *Rev. Geophys.* 2012. V. 50. RG1003.
 39. U.S. National Research Council. Preventing the Forward Contamination of Europa. Washington, D. C.: NRC Press, 2000. 54 p.
 40. U.S. National Research Council. Preventing the Forward Contamination of Mars. Washington, D. C.: NRC Press, 2006. 166 p.
 41. U.S. National Research Council. Exploration of Antarctic Subglacial Aquatic Environments: Environmental and Scientific Stewardship. Washington, D. C.: NRC Press, 2007. 152 p.
 42. U.S. National Research Council. Assessment of Planetary Protection Requirements for Spacecraft Missions to Icy Solar System Bodies. Washington, D. C.: NRC Press, 2012. 100 p.
 43. *Verkulich S.R., Kudryashov B.B., Barkov N.I., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., Dmitriev A.N., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Talalay P.G., Lipenkov V.Ya., Savatyugin L.M., Kuz'mina I.N.* Proposal for penetration and exploration of sub-glacial Lake Vostok, Antarctica // *Mem. Natl. Inst. Polar Research*. 2002. V. 56. P. 245–252.
 44. *Woodward J., Smith A., Ross N., Thoma M., Grosfeld C., Corr H., King E., King M., Tranter M., Siegert M.* Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling // *Geophys. Research Letters*. 2010. V. 37. L11501.
 45. *Wright A., Siegert M.J.* The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: An update based on recent geophysical data, in *Antarctic Subglacial Aquatic Environments // Proc. of the Chapman Confer. on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments*. 2011. AGU, Washington, D.C., P. 9–26.

Summary

Antarctic subglacial lakes can represent extreme natural habitats for microorganisms from the position of their evolution and adaptation, as well as they can contain the information on Antarctic ice sheet history and climatic changes in their sediments. Now only direct measurements and sampling from these habitats can answer on many fundamental questions. Special precaution should be complied at penetration into these unique relic environments without unfavorable impacts and contamination. A number of recommendations were developed on levels of cleanliness and sterility during direct exploration and research of subglacial environments. Documents considered in the article are the first and necessary steps for appropriate and long-term ecological management of subglacial Antarctic environments. Today there are three projects of subglacial aquatic environment research which are in preparation and realization – the Russian project of Lake Vostok, the similar British project of Lake Ellsworth and the American project on Whillans Ice Stream. The programs of ecological stewardship for direct exploration of these lakes are discussed. All these subglacial aquatic objects of further exploration and research are so various on their structure, age and regime, that only results of all programs as a whole can help to draw us a uniform picture of a subglacial ecological system. Ecological stewardship of these should provide the minimal ecological impact with maximal scientific results. On the basis of existing documents and recommendations the general approaches and the program of ecological stewardship for Lake Vostok research are discussed. Study of drilling fluid, drilling chips, Vostok ice core and the fresh frozen water will allow to make an assessment of biological and chemical contamination as a result of the first penetration and to modify the further stewardship program for the second penetration and direct exploration of lake water.