

В.В. ЛУКИН*, А.Н. МАРКОВ****,********Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия, lukin@aari.ru**Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия, lukin@aari.ru***Китайский Университет Наук о Земле, факультет Геофизики и Информационных технологий,
100083, Пекин, р-н Хайдянь, ул. Сюэюань, 29, Китай, am100@inbox.ru****Цзилиньский университет, Центр полярных исследований,
130013, Чанчунь, ул. Симиьнджу, 938, Китай, am100@inbox.ru**РОЛЬ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА АНТАРКТИДЫ
В ГЕНЕЗИСЕ И ЭВОЛЮЦИИ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК**

Крупнейший на нашей планете ледниковый антарктический щит оказывает значительное влияние на формирование и изменчивость климата, систему циркуляции океанических вод, биоразнообразие, а также на поверхностные и подледниковые озера этого региона. Возникновение водной толщи объектов гидрологии суши Антарктиды обычно связывается с процессами таяния снега и льда. В случае подледниковых озер этот процесс происходит на ложе ледника под влиянием термоизоляции геотермального потока большой толщей льда, энергии сил трения при движении ледника по коренным породам и больших величин давления, что позволяет скапливаться талой воде в углублениях подледникового рельефа. Однако в случае озера Восток генезис его водного тела связан с аккумуляцией атмосферных осадков и стоком древних рек, существовавших на этом континенте во время его нахождения в умеренном климатическом поясе до эпохи его оледенения, т. е. до начала формирования единого континентального ледникового покрова. Авторы статьи выделяют послойное строение ледника над озером Восток, объясняя генезис всех слоев различными этапами оледенения шестого континента. Анализ геологических, геофизических, гляциологических и биологических исследований в районе расположения котловины озера Восток убедительно доказывает, что водное тело этого подледникового озера существовало на поверхности до начала многолетнего оледенения Антарктиды, а ледник имеет лишь роль покрова, изолирующего водное тело. Этот же вывод подтверждается результатами численного моделирования процессов замерзания/таяния ледника, которые доказывают, что водная толща озера никогда не могла промерзнуть до дна вследствие намерзания воды на нижней поверхности ледника. Таким образом, водное тело и донные отложения озера Восток являются более древними природными объектами, чем антарктический ледниковый щит.

Ключевые слова: Антарктида, ледниковый щит над озером Восток, послойное строение ледника, водное тело озера, численное моделирование процессов таяния ледника, доледниковое происхождение озера.

V.V. LUKIN*, A.N. MARKOV****,*******

*Arctic and Antarctic Research Institute, 199397, St. Petersburg, ul. Beringa, 38, Russia, lukin@aari.ru

**St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab., 7–9, Russia, lukin@aari.ru

***China University of Geosciences, School of Geophysics and Information,
100083, Beijing, Haidian District, Xueyuan Road, 29, China, am100@inbox.ru****Jilin University, Polar Research Center,
130013, Changchun, Ximinzhushan str., 938, China, am100@inbox.ru**ROLE OF THE ANTARCTIC ICE SHEET
IN THE GENESIS AND EVOLUTION OF SUBGLACIAL LAKE VOSTOK**

The world's largest Antarctic ice sheet has a significant influence on the formation and variability of climate, the system of circulation of oceanic water, biodiversity and surface and subglacial lakes of this region. Appearance of the water strata of land hydrology bodies of Antarctica is usually connected with the processes of snow and ice melting. In the case of subglacial lakes this process occurs on the glacier bed under the influence of thermal isolation of the geothermal flow by a large ice strata, energy of friction forces due to the movement of the glacier over bedrocks and large pressure values, which allows melt water to accumulate in hollows of the subglacial relief. In the case of Lake Vostok, however, the genesis of its water body is connected with accumulation of atmospheric precipitation and discharge of ancient rivers that existed on this continent at the time of its

location in the temperate climatic belt before the epoch of its glaciation, i. e. before the beginning of formation of one whole continental glacial cover. We distinguish the layered structure of the glacier above Lake Vostok explaining the genesis of all layers by different stages of glaciation of the sixth continent. Analysis of geological, geophysical, glaciological and biological studies in the area of location of the valley of Lake Vostok convincingly proves that the water body of this subglacial lake existed on the surface before the onset of multiyear glaciation of Antarctica while the glacier has only a role of the cover isolating the water body. This conclusion is confirmed by the results of numerical modeling of the processes of glacier freezing/melting proving that the lake water strata could never freeze through to the bottom due to water adfreeze at the glacier bottom surface. Thus the water body and bottom sediments of Lake Vostok are more ancient natural bodies than the Antarctic ice sheet.

Keywords: Antarctica, ice sheet above Lake Vostok, layered glacier structure, lake water body, numerical modeling of the processes of glacier melting, pre-glacial lake origin.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Наиболее характерным признаком природной среды Антарктиды является ее ледниковый покров площадью около 14 млн км², или 98 % территории шестого континента. Общий объем антарктического континентального ледника составляет 26,5 млн км³. Его средняя толщина в восточной части материка равняется 2,5 км, а максимальная — 4,8 км, в то время как в западной — 1,1 и 2,0 км соответственно.

Крупнейший на Земле ледниковый щит оказывает значительное влияние на формирование и изменчивость климата, структуру, циркуляцию океанических вод и биоразнообразие в южном полярном регионе и на примыкающих к нему территориях. Кроме того, под влиянием ледника находятся многочисленные поверхностные и подледниковые озера, формирование водных тел которых связано с процессами таяния льда на ложе.

Указанные обстоятельства создали условия для обладания гляциологией статуса одного из самых престижных направлений антарктических научных исследований. Особое место в этом разделе науки занимает изучение палеоклиматических изменений в южном полярном регионе по данным ледяных кернов, которые представляют собой своеобразную летопись характеристик климата в далеком прошлом. С этой целью в период проведения Международного геофизического года (1957–1958 гг.) на шестом континенте стали буриться глубокие скважины в различных районах ледникового щита.

Самой глубокой в мировой практике бурения ледников стала скважина 5Г, пробуренная специалистами Санкт-Петербургского горного университета (СПбГУ) на российской антарктической станции Восток. Бурение началось в 1990 г. с целью получения ледяного керна для последующих палеоклиматических исследований и отбора проб коренных пород, подстилающих ледник. Перед началом работ российские специалисты еще не имели никаких сведений о существовании под станцией Восток большого подледникового озера (рис. 1), факт наличия которого был окончательно официально признан научным сообществом в 1993 г. [1]. Это обстоятельство существенным образом изменило планы буровиков и гляциологов, так как потребовало разработки новой технологии экологически чистого вскрытия данного озера.

Оно свершилось 5 февраля 2012 г., когда длина ствола скважины составила 3769,3 м. Полученный при бурении ледяной керн дал возможность гляциологам Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ) оценить его максимальный возраст, равный 420 тыс. лет, и определить четыре периода климатических изменений на планете (потепление–похолодание) продолжительностью 100 тыс. лет каждый. Эти данные палеоклиматических изменений на планете широко цитировались мировым научным сообществом при подготовке Киотского протокола от 11 декабря 1997 г. к Рамочной конвенции ООН об изменении климата 1992 г. [2] и Парижского соглашения по климату, принятого 12 декабря 2015 г. [3].

Разработка новых методов датировки ледяного керна в тех слоях ледника, для которых использование традиционных изотопных анализов и сравнительных методик не давало результатов, потребовала повторно новых образцов керна из глубоких слоев скважины ниже глубины 3250 м. В сезоне 2018–2019 гг. было выполнено отклонение ствола скважины 5Г для получения повторных образцов льда.

Эти работы продолжаются, и глубина скважины на начало февраля 2023 г. достигла 3535 м, т. е. за пять лет (с декабря 2018 г. по февраль 2023 г.) антарктических сезонов (каждый из которых длится лишь около двух месяцев) было пройдено 285 м ледника, а до поверхности озера осталось еще около 234 м. При существующих сроках сезонных работ и темпах бурения это серьезно отдалает перспективы начала изучения водного тела озера. Более того, существует экспертное мнение, что для изучения непосредственно оз. Восток следует бурить новую скважину большего диаметра с использованием альтернативной смеси керосина и фреона для буровой жидкости.

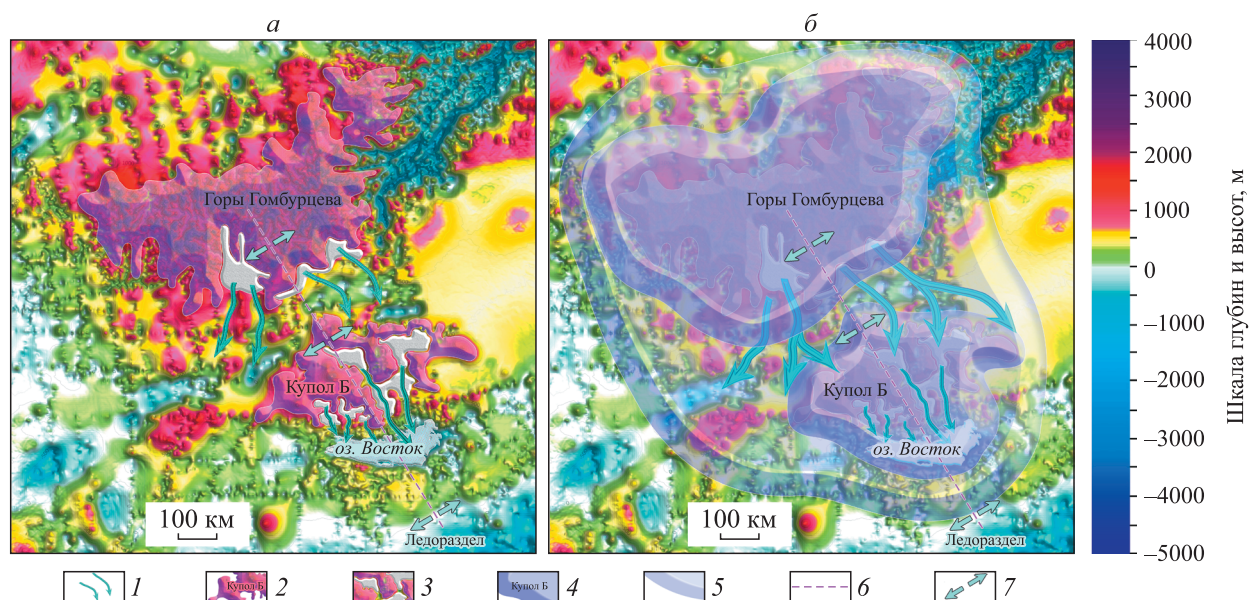


Рис. 1. Эволюция оледенения в районе оз. Восток: «глетчерный» (а) и «купольно-покровный» (б) этапы.

1 — вероятные глетчерные потоки; 2 — ледники на горных вершинах и хребтах; 3 — ледники в горных цирках; 4 — ледниковые купола (купол Б и купол горы Гамбурцева); 5 — ледниковый покров; 6 — ледораздел, простирающийся от гор Гамбурцева, через горную систему Купола Б в направлении восток-северо-восток до района Купола Конкордия (станция Купол Конкордия) [22] — линия 3–В профиля разреза на рис. 3, б; 7 — основные направления разделения общего потока льда в области ледораздела. Топооснова рельефа коренных горных пород изображена по данным проекта «BEDMAP2» (цвет шкалы глубин и высот применим только для топоосновы рельефа коренных горных пород).

Применение новых разработок определения возраста льда, предложенных Лабораторией изменения климата и окружающей среды ААНИИ, позволили в последние годы получить новую максимальную датировку возраста ледяного керна в 1,2 млн лет [4] и, по сути, уже достигнуть цели, задекларированной при отклонении ствола скважины.

Объективно уже состоявшееся выполнение климатологических и гляциологических задач бурения ледникового покрова над оз. Восток должно последовательно сконцентрировать нацеленность научных и технических проектов на гидрологические, геологические и биологические исследования его водного тела и донных отложений. В связи с этим возрастает и актуальность решения вопроса взаимоотношения эволюции ледникового покрова и водного тела оз. Восток.

Широко распространенная гипотеза о происхождении водного тела подледникового оз. Восток — это процесс таяния на нижней поверхности ледника, возникающий вследствие термоизоляции геотермального потока большой толщиной льда и выделения энергии при его трении о коренные породы в процессе движения в сторону побережья шестого континента. Дополнительным механизмом таяния являются высокие значения давления на нижней поверхности ледника при его толщине в 2–3 км и более.

В соответствии с этой гипотезой, образовавшаяся талая вода может скапливаться в отрицательных формах коренного рельефа и, будучи несжимаемой, формировать подледниковые озера. Продолжающееся накопление подледниковых вод может приподнимать ледяной щит и формировать мощные водные потоки, которые будут направлены в сторону его краевых зон. Этот эффект может привести к катастрофическим природным явлениям на некоторых береговых научных станциях. Впервые этот природный механизм теоретически обосновал советский гляциолог И.А. Зотиков (1926–2010) [1, 5]. В нашей статье рассматривается, насколько применима эта гипотеза к самому крупному из известных на Земле подледниковому озеру Восток и как ледниковый покров оказывал влияние на его эволюцию.

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА НАД ОЗЕРОМ ВОСТОК

Отечественные гляциологи, рассматривая вертикальную структуру антарктического ледникового щита над регионом оз. Восток, обычно выделяют три естественные пачки слоев в его вертикальной структуре. Верхняя из них до глубины 3310 м (рис. 2 и 3, слой I) представляет собой лед атмосферно-

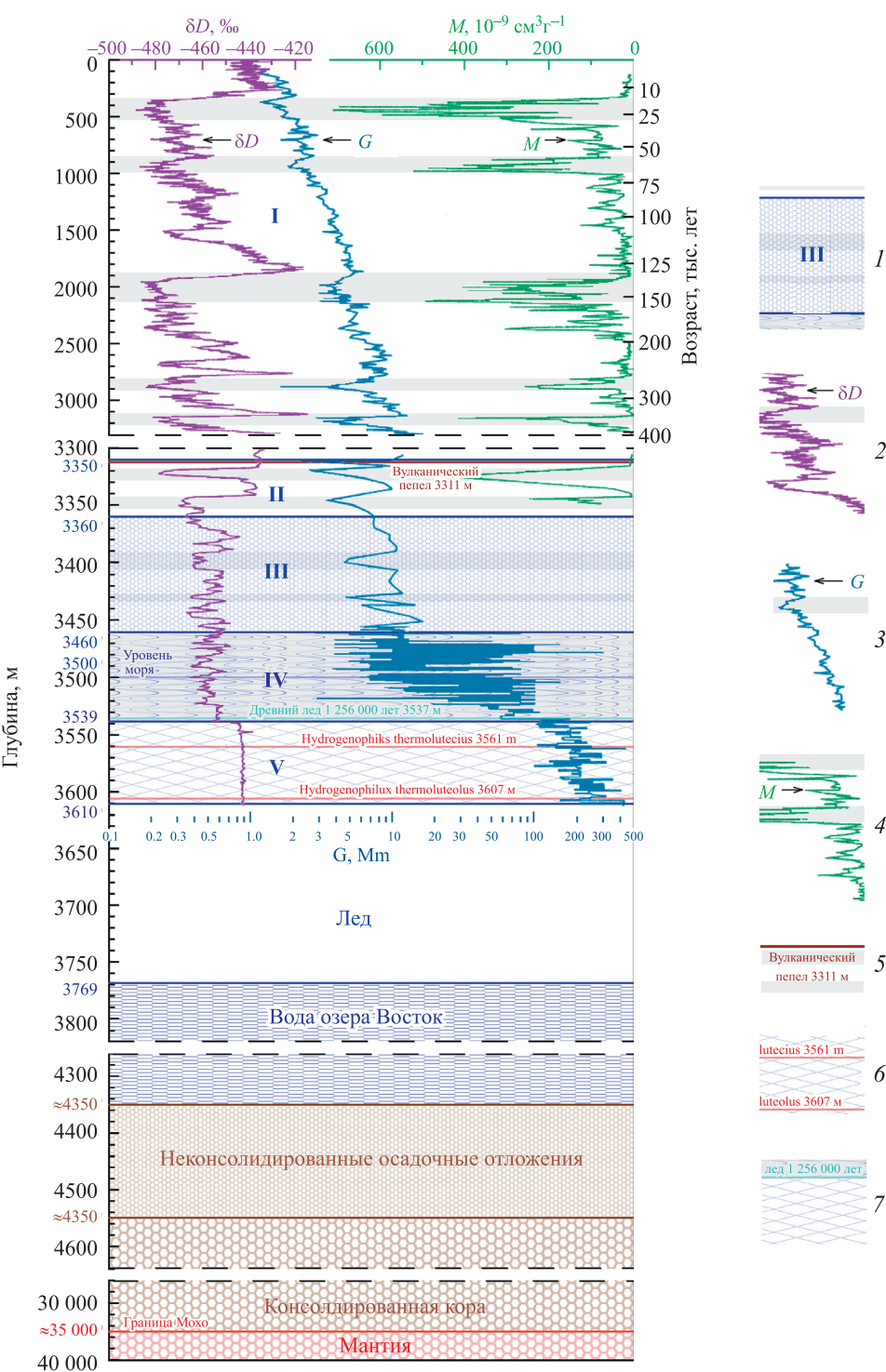


Рис. 2. Стратиграфическая колонка по линии скважины на станции Восток.

1 — типы выделяемых слоев льда (I–VI) (пояснения в тексте). Графики (по анализу керн из скважины на станции Восток) [12, 15]: 2 — изотопный состав льда (δD , ‰); 3 — размера ледяных кристаллов (G , мм); 4 — объемная концентрация микрочастиц атмосферного происхождения (M , 10^{-9} см³хг⁻¹). Глубины обнаружения в керне особенного состава или свойств льда: 5 — повышенная концентрация микроскопических примесей вулканической пыли — 3311 м; 6 — термофильные бактерии *Hydrogenophilus thermoluteolus* [14] — 3607 и 3561 м; 7 — «реликтовый» лед, возраст которого определен в 1,2 млн лет или даже более [4] — 3538 м.

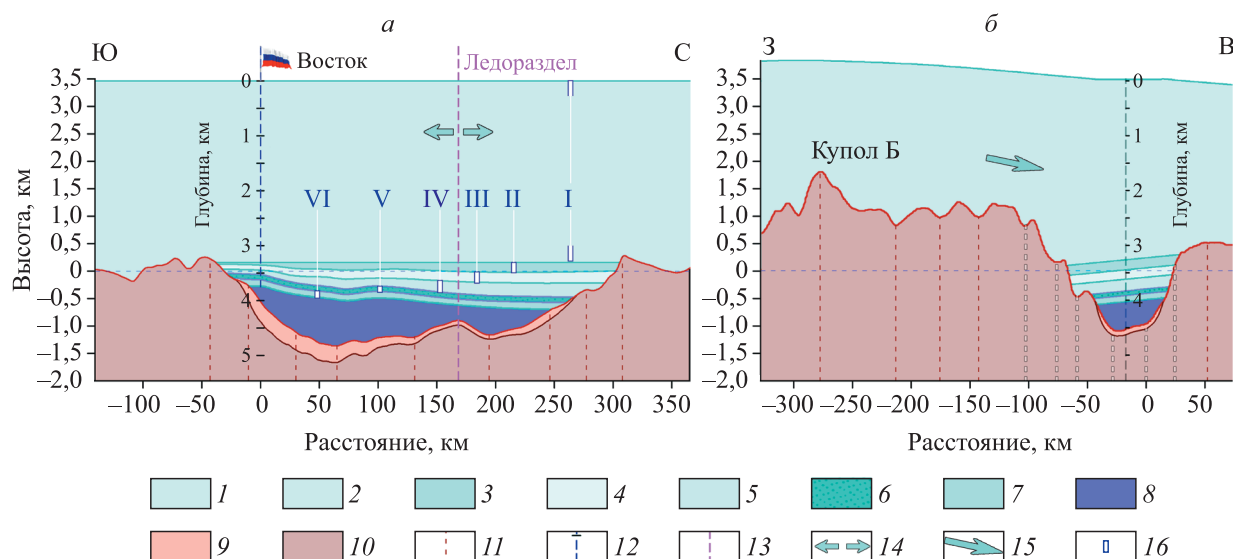


Рис. 3. Схематичный разрез озера Восток: вдоль продольной оси по профилю с Юга на Север (Ю–С) (а) и вдоль поперечной оси по профилю с Запада на Восток (3–В), практически совпадающей с осью ледораздела района «горы Гамбурцева — купол Б — оз. Восток» (см. рис. 1 и рис. 3, а) (б) [18, 19].

1 — типы выделяемых слоев льда (I–VI) (пояснения в тексте) (см. рис. 2); 2 — атмосферный лед с ненарушенным климатическим сигналом датировки (слой I на рис. 2); 3 — лед с нарушением и/или отсутствием явного климатического сигнала датировки и признаками тектонического несогласия в залегании ледяных слоев: 4 — слой II на рис. 2; 5 — слой III на рис. 2; 6 — «загрязненный» озерный лед («озерный лед 1») (слой V на рис. 2); 7 — конгломерационный «чистый» озерный лед («озерный лед 2») (слой VI на рис. 2); 8 — водное тело озера; 9 — донные отложения озера; 10 — породы кристаллического фундамента; 11 — вероятные разломы; 12 — скважина на станции Восток; 13 — плоскость ледораздела и разрез по линии 3–В (см. рис. 1 и рис. 3, б); 14 — направления растекания ледникового покрова над ледоразделом; 15 — основное направление потоков глетчеров и ледникового покрова; 16 — границы поверхностей залегания выделяемых слоев льда.

го происхождения (уплотненный снег), в котором по изотопным анализам четко регистрируется последовательный климатический сигнал (см. рис. 2) на протяжении последних 420 тыс. лет. Вторая пачка слоев, находящаяся в промежутке глубин 3310–3539 м (см. рис. 2 и 3, слои II, III, IV), также образована из уплотненного атмосферного снега, но в нем не регистрируется последовательный климатический сигнал (см. рис. 2). Наконец, нижняя пачка (3539–3769 м) (см. рис. 2 и 3, слои V, VI), как показали изотопные исследования, образована из замерзшей воды подледникового озера.

Авторы настоящей статьи, используя палеоклиматические реконструкции процесса оледенения Антарктиды, а также данные радиолокационных зондирований толщи ледника и геофизических измерений параметров глубокой ледяной скважины на станции Восток, предлагают в качестве альтернативы вышеназванной трехслойной структуре другую вертикальную стратиграфию строения толщи ледника в соответствии с предполагаемыми основными отличительными этапами эволюции (генезиса) оледенения Антарктиды: «глетчерный» и «купольно-покровный» этапы.

«Глетчерный» этап оледенения Антарктиды (см. рис. 1, а). Ледниковый покров Антарктиды начал образовываться в локальных горных системах на границе эпох эоцена и олигоцена около 34 млн лет назад. К таким системам относились Трансантарктические горы, горы Гамбурцева, а также небольшие по высоте и территории горные системы в районах Купола Б (см. рис. 1, а), Земли Королевы Мод и Земли Виктории. Локально образовавшийся ледяной покров быстро эволюционировал, объединившись в единую систему оледенения Антарктиды за счет похолодания климата, завершив этот процесс в эпоху раннего олигоцена (33,6 млн лет назад) [6]. В конце раннего–начале среднего миоцена около 17–16 млн лет назад (финал «переходного мира») ледяной покров континента сильно диссипировал, что привело к резкому сокращению его площади. Причиной этого явления стал климатический оптимум (потепление). При этом остаточный ледяной покров сохранился на вершинах горных систем в виде ледяных куполов [7]. В ледниковую эпоху среднего миоцена около 15–13 млн лет назад началась повторная волна общего оледенения Антарктиды. Локальные ледниковые центры на вершинах горных систем вновь объединились в единый ледниковый покров всего материка, достигший современного устойчивого состояния [7–11].

Начало оледенения Антарктиды естественным образом привело к формированию льда на поверхности региональных водоемов. На первых этапах этот процесс носил сезонный характер, когда льды появлялись в холодный зимний период года и исчезали в теплое летнее время. Затем, по мере общего климатического похолодания атмосферы, этот лед на поверхности озер перестал таять и продолжал увеличиваться по своей толщине за счет значительных понижений температуры воздуха в течение всего года. В результате образовался реликтовый лед, связанный с процессами замерзания поверхностного слоя воды озера, который мембраной изолировал водное тело оз. Восток, а в последующем увеличился в толщине вследствие процессов промерзания верхних слоев воды озера (см. рис. 1, а). По данным современных гляциологических исследований [12], толщина этого слоя составляет около 160 м (в интервале глубин 3769–3610 м) (см. рис. 2, 3, слой VI). Здесь и далее глубины приводятся по длине ледяного керна глубокой скважины 5Г на станции Восток. При этом данный лед («чистый», «конжеляционный», «озерный лед 2») не имеет климатического сигнала, микроминеральных и микробиологических примесей и содержит кристаллы гигантских размеров, достигающих одного метра и более [12].

В периоды потепления и похолодания Антарктиды в котловину рельефа, в которой находилось древнее озеро (см. рис. 1, 3), в результате процесса таяния над первоначальным льдом озера стали скапливаться талые воды, загрязненные минеральными частицами грунта, и атмосферные осадки. При этом первоначально образовавшийся на поверхности озера слой льда («озерный лед 2») не был полностью уничтожен (см. рис. 3, слой V). Наступивший за этим очередной этап оледенения привел к формированию второго слоя озерного льда, загрязненного частицами грунта и содержащего специфические «водные карманы» (см. рис. 3, слой V). Вероятно, что в периоды потепления в котловину оз. Восток стекали воды из озер, расположенных вокруг этой котловины [13], в которых наблюдалась геотермальная активность. Этот процесс привел к включению в данный «загрязненный» слой льда молекул ДНК бактерий-термофилов [14] (см. рис. 2). Этот «загрязненный» озерный лед («озерный лед 1») находится в слое 3610–3539 м [12] (см. рис. 2, 3, слой V).

Впоследствии на слой этого озерного льда надвигался глетчерный лед, спускавшийся с вершин горной системы Купол Б, близлежащей к озеру (на удалении около 150 км) (см. рис. 1, а). Он располагается в слое 3539–3460 м (см. рис. 2, 3, слой IV). Встретив преграду в виде берега и локальной прибрежной взвешенности на поперечной оси восточного борта озера, этот поток разделился на два, следующих в субмеридиональном взаимопротивоположном направлении вдоль продольной оси озера. Анализ ледяного керна показал, что в интервале глубин 3539–3460 м, наблюдается пласт мощностью 79 м (см. рис. 2, 3, слой IV), характеризующийся значительным увеличением и чрезвычайно большой флуктуацией по глубине размеров кристаллов льда (от 10 до 100 мм и более) (см. рис. 2); это является признаком наличия интенсивных сдвиговых деформаций льда в данном слое [12, 15, 16]. Указанные сдвиговые деформации, вероятно, возникли во льду глетчерного типа при его сложном распространении из района горной системы Купол Б в котловину оз. Восток. В этом интервале в анализе керна отсутствует явный климатический сигнал, но на глубине около 3538 м, близко к границе этого слоя и нижележащего, обнаружен «реликтовый» лед, возраст которого определен в 1,2 млн лет или даже более [4] (см. рис. 2).

«Купольно-покровный» этап оледенения Антарктиды (см. рис. 1, б). Над льдом глетчерного типа стал развиваться небольшой слой мощностью 100 м (3460–3360 м) (см. рис. 2, 3, слой III) льда атмосферного «купольного» происхождения, образовавшийся из уплотненных снежных осадков, консолидированных на ледовом Куполе Б (см. рис. 1, б). Этот лед также не имеет последовательного климатического сигнала при использовании традиционных изотопных анализов определения его возраста (см. рис. 2). Данный атмосферный лед заполнил котловину озера до верхнего края его бортов и начал растекаться по поверхности за ее пределы.

Выше он был перекрыт еще одним потоком глетчерного (см. рис. 1, а, б) и атмосферно-«купольного» льда (см. рис. 1, б), пришедшего в котловину оз. Восток из более удаленного района гор Гамбурцева (около 500 км от озера) (см. рис. 1). Разное время достижения котловины озера глетчерными потоками и покровной экспансией льда от Купола Б и аналогичного льда от гор Гамбурцева объясняется различиями расстояний до озерной котловины. Приняв величину скорости распространения ледников в эпоху оледенения по известным [17] геологическим данным на севере Европы за 75 м/год, можно оценить, что глетчерный поток от Купола Б мог достигнуть озерной котловины примерно за 2000 лет, а от гор Гамбурцева — за 6600 лет. Лед этого происхождения не имеет последовательного климатического сигнала и располагается в слое 3360–3310 м (см. рис. 2, 3, слой II), а также имеет на глубине 3311 м, ближайшей к своей верхней поверхности, слой повышенного содер-

жания вулканического пепла (см. рис. 2), что может быть обусловлено как единовременным «катастрофическим» его выпадением на поверхности ледника, так и длительной аккумуляцией при отсутствии роста (или даже таяния) ледника в период смены «эпох оледенения».

Таким образом, временной интервал накопления льда атмосферного происхождения между двумя глетчерными потоками составляет около 4600 лет. При мощности этого слоя 100 м (3460–3360 м) (см. рис. 2, 3, слой III) эффективная (т. е. без учета растекания) скорость его аккумуляции, соответственно, составила около 2,2 см/год.

По мнению авторов, именно более интенсивные реликтовые глетчерные потоки из северных горных цирков района Купола Б (см. рис. 1) и с гор Гамбурцева (см. рис. 1), обтекающие поднятия Купола Б, обуславливают и современную структуру потока нижней части всего ледникового покрова по направлению в северный район озерной котловины и объясняют значительное превышение общей толщины ледника и его погружение в воду в северной части озера (4350 м) по сравнению с его южной частью (3600 м) [18] (см. рис. 3, а). Увеличенная общая толщина ледника (около 200 м) в западной прибрежной части оз. Восток по сравнению с восточной [18] (см. рис. 3, б) объясняется нами аналогичным гидростатическим погружением потока масс всего «западного» льда в воду при втекании в котловину оз. Восток. Такое объяснение не противоречит имеющимся на современном этапе теоретическим и экспериментальным данным и объясняет различную глубину нижней поверхности ледникового покрова на озере без применения гипотез процессов таяния-намерзания на этой поверхности и гляциального генезиса всего водного тела оз. Восток.

Специализированные исследования вертикального изменения скоростей распространения акустических сигналов при выполнении сейсмического зондирования [19] также показали различный генезис естественных ледяных слоев в нижней части разреза ледникового покрова.

Всю толщину вышележащего слоя от поверхности до 3310 м занимает лед атмосферного происхождения (см. рис. 1, б, рис. 2, 3, слой I), в котором прослеживается четко выраженный последовательный климатический сигнал (см. рис. 2) с датировкой максимального возраста льда до 420 000 лет [20]. Этот лед создает основу современного покровного оледенения Антарктиды (см. рис. 1, б). Следует отметить, что условная нижняя граничная поверхность этого слоя и переход на глубине 3310 м от льда, датированного непрерывным климатическим сигналом, к недатируемому содержит вулканический пепел (см. рис. 2) и практически лежит в плоскости верхней кромки берегов котловины оз. Восток (см. рис. 3). Такое совпадение уровней поверхностей может быть объяснено процессом транзита потока масс атмосферного льда (см. рис. 2, 3, слой I) всего ледникового покрова над берегами озера и над «реликтовой линзой» масс льда, «застопоренной» в котловине этих берегов (см. рис. 2, 3, слой II–VI).

Многие антарктические гляциологи рассматривают движение ледникового покрова от вершин куполов центральных районов в сторону побережья как «глыбовый» или «пленочный» процесс динамики масс, в котором ледник движется как одно общее тело. Однако спутниковые наблюдения за дрейфом поверхности ледника показали, что он соответствует сложной конгломерации различных направленных потоков, соответствующих сильно дифференцированной горной морфологии ложа ледника (см. рис. 1) и, вероятно, унаследовавших динамику реликтовых глетчерных потоков [21–23] (см. рис. 1). Радиолокационные исследования вертикальной структуры ледника, геофизический каротаж в глубоких ледяных скважинах и анализ кристаллической структуры строения ледника по вертикали указывают на слоистую структуру ледникового покрова, имеющую различные скорости и направления движения отдельных слоев [24, 25]. Это явление было подтверждено дипломом № 472 о научном открытии «Явление послойного течения масс льда ледникового покрова Антарктиды», выданного 2 декабря 2014 г. Международной академией авторов научных открытий и изобретений [26, 27].

При поэтапном накоплении льда структура потока имеет ряд существенных особенностей. Вся толща льда покровного оледенения (в интервале современных глубин от поверхности до 3310 м) (см. рис. 2, 3, слой I) находится в «транзитном потоковом» растекающемся состоянии, т. е. не накапливается и не имеет «глыбовое» перемещение над акваторией озера, а пластически течет в двух генеральных, существенно различных направлениях: на северо-восток в северной, а на юго-восток в южной части озера. Этот вывод сделан на основе данных спутникового мониторинга дрейфа ледника по программам радиолокационной интерферометрии ERS [21], RADARSAT [22] и высокоточной спутниковой геодезии GNSS [23]. В результате и над водной поверхностью средней части озера прослеживается общий для района ледораздел (см. рис. 1, 3), сформированный коренными горными породами и простирающийся от гор Гамбурцева, через горную систему Купол Б в направлении вос-

ток-северо-восток до района Купола Конкордия (станция Купол Конкордия) [22] (см. рис. 1). Материалы радиолокационных зондирований толщин ледника [21] и геофизических наблюдений в глубокой ледяной скважине на станции Восток [24, 25] показывают послойное «веерное» по направлению различие векторов движения ледника также и по его глубине, обусловленное вышеназванной вариационной зависимостью структуры потока льда от «высокочастотной» морфологии рельефа коренных горных пород и «низкочастотной» морфологией поверхности ледника в районе озера.

Современные направления гляциологических исследований ледяного покрова в районе станции Восток сосредоточены на практической оценке новой методики изотопной датировки слоев ледяного керна, в которых ранее регистрировалась высокочастотная изменчивость с нарушенной непрерывностью возраста льда, а также на поиске наиболее древнего льда на нашей планете над северной частью подледникового оз. Восток или в районе Купола Б [4].

ГЕНЕЗИС ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Существование водного тела озера под ледяным покровом является неоспоримым фактом, доказанным результатами сейсмического и радиолокационного зондирования, а также двукратным (2012 и 2015 гг.) вскрытием его водной толщи. При этом вопрос о происхождении этого водного слоя продолжал оставаться открытым. Как уже сообщалось выше, существуют две гипотезы происхождения водного тела оз. Восток.

Первая из них — гляциальная — связывается с процессами возможности таяния нижней поверхности ледника за счет геотермального потока, энергии сил трения при его движении по коренным породам, высоких значений давления при большой толщине ледника и термоизолирующего влияния толщи ледникового покрова.

Вторая гипотеза — тектоническая — предполагает возможность возникновения водного тела озера в геологический период, существовавший до оледенения Антарктиды, когда этот континент еще находился в умеренных широтах южного полушария.

Образование водного тела озера до начала оледенения Антарктиды логично объясняется наличием двух нижних слоев ледника, сформированных из замерзшей воды озера и воды, замерзавшей на этой поверхности. Возможность сохранения уникальной древней водной толщи под ледниковым покровом могла быть обеспечена только в том случае, если оз. Восток не промерзло до дна в период процессов оледенения континента. В этом случае озерная вода будет иметь намного более древний возраст, чем ледяной покров Антарктиды.

Оценка вероятности промерзания/непромерзания водной толщи озера до дна была произведена по результатам численного термодинамического моделирования на основе решения одномерной задачи Стефана, выполненного И.А. Зотиковым и Н.С. Даксбери [28, 29]. Из результатов этих расчетов в допущениях достижения термодинамического равновесия системы «ледниковый покров — водное тело озера — донный геотермальный поток» следует, что максимальная мощность слоя льда, намерзающего в воде озера на нижней поверхности ледникового покрова, может составлять лишь около 53 м. Причем этот слой утолщается лишь в начальный период (длительностью всего около 3300 лет) роста ледникового покрова (до толщины всего 600 м), а в последующем при увеличении мощности ледяного щита и его термоизоляционного влияния ледяной фронт в воде озера изменяет свое движение вспять (толщина уменьшается) за относительно короткое время. По этим результатам следует, что оз. Восток не могло промерзнуть на всю глубину при средней толщине водного слоя озера 400 м и последующем увеличении мощности ледникового покрова и его термоизоляционного влияния [28, 29]. Эти расчеты были выполнены до получения экспериментальных данных анализа керна [12, 15, 16], которые определили мощность этого наблюдаемого слоя льда, намерзшего в толще озера, соразмерную рассчитанной — в 159 м («чистый», «озерный лед 2» в интервале глубин 3769–3610 м) (см. рис. 2, 3, слой VI).

Резюмируя результаты моделирования, авторы полагают, что гипотеза о тектоническом генезисе оз. Восток в период до первичного оледенения Антарктиды весьма правдоподобна, в отличие от отвергнутой ими гипотезы субгляциального генезиса (вследствие базального таяния) в период после образования ледникового покрова.

В этом случае роль ледникового покрова в генезисе оз. Восток ограничивается лишь изоляцией вод озера от любых контактов с атмосферой. Полученные в XXI в. данные геологических, геодезических, гляциологических, геофизических и микробиологических исследований этого природного объекта убедительно подтверждают этот вывод.

И.А. Зотиков и Н.С. Даксбери провели также численные эксперименты по оценке чувствительности решения к различным верхним граничным условиям и значениям внутреннего планетарного теплового потока для Земли, Марса и одного из спутников Юпитера — планеты Европа [29] и пришли к однозначному выводу, что даже самые предельно допустимые условия не могут кардинально поменять результаты расчета, а основной вывод — оз. Восток возникло не в результате базального таяния, а было открытым озером на континенте до многолетнего оледенения Антарктиды и никогда полностью не замерзало. Интерес к другим космическим объектам Солнечной системы был связан с тем, что под полярными шапками Марса и ледниковым покровом Европы, по мнению некоторых космических исследователей [30], находится вода в жидкой фазе, в которой возможно обитание микроорганизмов внеземного происхождения.

Примечательно, что И.А. Зотиков — один из авторов новой «тектонической» гипотезы генезиса оз. Восток — ранее был создателем теории возможности таяния нижней поверхности ледника и образования за счет этого процесса различных подледниковых водных объектов. Очевидно, что И.А. Зотиков в начале 1960-х гг., в период создания своей первичной гляциальной теории [1, 5], еще не имел всеобъемлющих сведений о характеристиках подледникового оз. Восток. В последующем на основе современных фактических данных в 2000 г. он предложил и стал сторонником именно тектонического генезиса этого подледникового озера [28, 29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гляциологические и палеоклиматические исследования по данным ледяного керна из скважины 5Г на отечественной антарктической станции Восток, несомненно, стали одним из наиболее известных достижений советской и российской науки. Поэтому вполне понятно, почему специалисты этих областей знаний стремятся сохранить эту уникальную и самую глубокую (3769 м) из всех пробуренных на ледниках планеты подобных скважин для продолжения своих исследований, направленных на поиск самого древнего льда на Земле. В то же время данная скважина представляет собой самый короткий путь для начала изучения водного тела и донных отложений подледникового оз. Восток, а совместить эти два проекта в одной скважине технологически невозможно. Так, скважина 5Г на станции Восток стала своеобразным «яблоком раздора» между гляциологами и климатологами, с одной стороны, и гидрологами, геохимиками, геологами и биологами — с другой.

Гипотетически оледенение Антарктиды могло бы привести к промерзанию водной толщи древнего антарктического озера до дна. Для изучения возможности этого процесса в оз. Восток были применены методы численного термодинамического моделирования. Его результаты показали, что водное тело озера было погребено под термозащитным льдом, и промерзание озерных вод до дна за весь эволюционный период озера не представлялось возможным.

Обобщение данных геофизических исследований в скважине 5Г по всей ее длине и гляциологических структурных характеристик ледяного керна показало наличие слоистого строения толщи ледника (шесть естественных слоев) с различными физическими и динамическими свойствами. Два нижних слоя ледника — 3769–3610 и 3610–3539 м — по данным их изотопных анализов были образованы из замерзшей озерной воды и воды, замерзавшей на этой поверхности, а не из уплотненного атмосферного снега. Это свидетельствует о том, что водное тело озера образовалось и было изолировано ледяной «мембраной» по поверхности еще до эпохи оледенения Антарктиды. Проведение геохимических и микробиологических исследований ледяных кернов из этих слоев не может заменить собой в вопросах исследования оз. Восток контактные методы физико-химического и биохимического зондирования толщи вод и их пробоотбора, дискретного по вертикали.

Решение приоритета гляциологических или лимнологических исследований через глубокую скважину 5Г на станции Восток должно оставаться за государственными органами власти, которым необходимо учитывать не только научные, но и внешнеполитические аспекты данных проектов. Прекращение Россией изучения подледникового озера Восток будет рассматриваться как несостоятельность научно-технических позиций нашей страны в этом направлении антарктических исследований.

Таким образом, происхождение и дальнейшее существование водного тела озера Восток не могут быть связаны с процессами таяния нижней поверхности ледника. Указанные обстоятельства позволяют сделать следующие выводы.

1. Озеро Восток в Антарктиде необходимо рассматривать как компонент гидросферы — древний гидрологический, геологический и географический объект, соответствующий присвоенному ему в 1958 г. штурманом советской полярной авиации Р.В. Робинсоном и обоснованному последующими

научными исследованиями определению «озера». Объект, возникший соответствующим гидросфере естественным образом, заполненный водой и донными отложениями и эволюционировавший не по причине и не в результате таяния льда на ложе ледникового покрова Антарктиды, а напротив, подвергшийся изоляции и консервации этим ледниковым покровом вследствие перекрытия сверху.

2. Ледниковый покров Антарктиды не оказывает каких-либо существенных влияний на эволюцию водного тела озера, кроме его изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце XX—начале XXI вв. наиболее знаковыми достижениями отечественной антарктической науки стали палеоклиматические реконструкции атмосферы Антарктиды за последние 420 тыс. лет по данным характеристик ледяных кернов со станции Восток и вскрытие подледникового озера под этой станцией.

Последнее произошло 5 февраля 2012 г. и стало краеугольным камнем в продолжении гляциологических исследований по поиску самого древнего льда и изучению водного тела и донных отложений подледникового оз. Восток, так как совмещение двух этих проектов в одной глубокой ледяной скважине было невозможно. Выбор был сделан в пользу гляциологии, что надолго отложило лимнологические исследования.

Вместе с тем установлено, что водное тело и, соответственно, донные отложения оз. Восток по своему происхождению являются существенно более древними с геологической точки зрения природными объектами, чем ледяной покров Антарктиды. Это определяет большую значимость и перспективность продолжения их исследований для отечественного научного сообщества. Следует учитывать, что исследовательский процесс этого уникального природного объекта неразрывно связан с необходимостью разработки новых технологий и инженерно-конструкторских решений, по своей сложности не уступающим проектам по контактному изучению космических объектов Солнечной системы.

Вынужденный перерыв в изучении подледникового оз. Восток оказал серьезное влияние на дальнейшее развитие в изучении этого уникального природного объекта. Хочется надеяться, что принятые в последние годы в нашей стране решения повлияют на возобновление процесса научных исследований подледникового озера Восток для укрепления международных позиций нашего государства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zotikov I.A.** The Antarctic Subglacial Lake Vostok: Glaciology, Biology and Planetology. — Springer Praxis Books Geophysical Sciences, 2006. — 139 p. — DOI: 10.1017/S0032247407007255
2. **Организация Объединенных Наций** [Электронный ресурс]. — <https://www.un.org/ru/climatechange/Paris-agreement> (дата обращения 08.10.2023).
3. **Организация Объединенных Наций** [Электронный ресурс]. — https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/kuoto.shtml (дата обращения 08.10.2023).
4. **Lipenkov V.Y., Salamatin A.N., Jiang W., Ritterbusch F., Bender M.L., Orsi A., Landais A., Uchida T., Ekaykin A.A., Raynaud D., Yang G.-M., Lu Z.-T., Chappellaz J.** New ice dating tools reveal 1.2 Ma old meteoric ice near the base of the Vostok core // Geophysical Research Abstracts EGU General Assembly. — 2019. — Vol. 21. — P. 8505.
5. **Зотиков И.А.** Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды // Антарктида. Докл. Комиссии. — М.: Наука, 1962. — С. 27–40.
6. **DeConto R.M., Pollard D.** Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂ // Nature. — 2003. — Vol. 421. — P. 245–249. — DOI: 10.1038/nature01290
7. **Frigola A., Prange M., Schulz M.** Boundary conditions for the Middle Miocene Climate Transition (MMCT v1.0) // Geoscientific Model Development. — 2018. — Vol. 11, N 4. — P. 1607. — DOI: 10.5194/gmd-11-1607-2018
8. **Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A.** A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. — 1996. — Vol. 381, N 6584. — P. 684–686.
9. **Holbourn A., Kuhn W., Schulz M., Erlenkeuser H.** Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion // Nature. — 2005. — Vol. 438. — P. 483–487. — DOI: 10.1038/nature04123
10. **Lewis A.R., Marchant D.R., Ashworth A.C., Hedenäs L., Hemming S.R., Johnson J.V., Leng M.J., Machlus M.L., Newton A.E., Raine J.I., Willenbring J.K., Williams M., Wolfe A.P.** Mid-Miocene cooling and the extinction of tundra in continental Antarctica // Proc. Natl Acad. Sci. USA. — 2008. — Vol. 105 (31). — P. 10676–10680. — DOI: 10.1073/pnas.0802501105
11. **Barret P.J.** Antarctic palaeoenvironment trough Cenozoic times — a review // Terra Antarctica. — 1996. — Vol. 3, N 2. — P. 103–119.

12. Липенков В.Я., Екайкин А.А., Шибаев Ю.А., Полякова Е.В., Преображенская А.В. Гидрологический режим подледникового озера Восток по данным изучения керна озерного льда // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 77–89.
13. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег. — 2011. — № 1 (113). — С. 13–24.
14. 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 // Int. Journ. Astrobiol. — 2004. — Vol. 3. — P. 1–12. — DOI: 10.1017/S1473550404001879
15. Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н. История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2000. — № 72. — С. 197–236.
16. Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice // Philos. Transactions of the Royal Society. Ser. A. — 2016. — Vol. 374. — P. 20140303. — DOI: 10.1098/rsta.2014.0303
17. Patton H., Hubbard A., Andreassen K., Winsborrow M., Stroeven A.P. The build-up, configuration, and dynamical sensitivity of the Eurasian ice-sheet complex to Late Weichselian climatic and oceanic forcing // Quaternary Science Reviews. — 2016. — Vol. 153, Iss. 1. — P. 97–121. — DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.10.009
18. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лед и снег. — 2012. — Т. 52, № 4. — С. 31–38. — DOI: 10.15356/2076-6734-2012-4-31-38
19. Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В. Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида), результаты исследований 1997 года // Материалы гляциол. исслед. — 1999. — № 86. — С. 152–159.
20. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaigle G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. — 1999. — Vol. 399. — P. 429–436. — DOI: 10.1038/20859
21. Tikku A.A., Bell R.E., Studinger M., Clarke G.K.C. Ice flow field over Lake Vostok, East Antarctica inferred by structure tracking // Earth Planetary Science Letters. — 2004. — Vol. 227. — P. 249–261. — DOI: 10.1016/j.epsl.2004.09.021
22. Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B. Ice flow of the Antarctic Ice Sheet // Science Express. — 2011. — Vol. 333. — P. 1427–1430. — DOI: 10.1126/science.1208336
23. Richter A., Fedorov D.V., Fritsche M., Popov S.V., Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Lukin V.V., Matveev A.Yu., Grebnev V.P., Rosenau R., Dietrich R. Ice flow velocities over subglacial Lake Vostok, East Antarctica, determined by 10 years of GNSS observations // Journ. Glaciol. — 2013. — Vol. 59, N 214. — P. 315–326. — DOI: 10.3189/2013JG12J056
24. Марков А.Н., Котляков В.М. Особенности динамики ледникового покрова Восточной Антарктиды // Докл. РАН. — 2006. — Т. 411, № 3. — С. 410–413.
25. Марков А.Н., Даль-Йенсен Д., Котляков В.М., Голубев В.Н., Леонов М.Г., Лукин В.В. Динамика покровных ледников Антарктиды и Гренландии по результатам скважинных, радиолокационных и космических наблюдений // Лед и снег. — 2016. — Т. 56, № 3. — С. 309–332. — DOI: 10.15356/2076-6734-2016-3-309-332
26. Русское географическое общество [Электронный ресурс]. — <https://rgo.ru/activity/redaction/news/nauchnoe-otkrytie-rossiyskikh-uchenykh/> (дата обращения 12.10.2023).
27. Сетевой центр коллективного пользования Санкт-Петербургского Горного университета императрицы Екатерины [Электронный ресурс]. — <http://sckp.spmi.ru/index.php/ru/nauchnie-otkritiya/89-nauchnye-otkrytiya> (дата обращения 12.10.2023).
28. Зотиков И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток (Антарктида) // Антарктика. Докл. Комиссии АН РФ. — 2000. — Т. 374, № 6. — С. 824–826.
29. Duxbury N.S., Zotikov I.A., Nealson K.H., Romanovsky V.E., Carsey F.D. A numerical model for an alternative origin of Lake Vostok and its exobiological implications for Mars // Journ. of Geophysical Research. — Vol. 106, Iss. E1. — P. 1453–146. — DOI: 10.1029/2000JE001254
30. Демидов Н.Э., Лукин В.В. Антарктида как полигон для отработки пилотируемых экспедиций на Луну и Марс // Астрономический вестник. — 2017. — Т. 51, № 2. — С. 117–135. — DOI: <https://doi.org/10.7868/S0320930X17020025>

Поступила в редакцию 08.11.2023

После доработки 15.12.2023

Принята к публикации 07.05.2024