

Отечественные геофизические исследования подледникового озера Восток, Восточная Антарктида

С.В. Попов^{1,2}, В.Н. Масолов¹, В.В. Лукин³

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Россия, Санкт-Петербург;

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург;

³Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, Санкт-Петербург

Russian geophysical research of the subglacial lake Vostok, East Antarctica

S. V. Popov^{1,2}, V. N. Masolov¹, V. V. Lukin³

¹Polar Marine Geosurvey Expedition, Russia, St. Petersburg;

²Saint Petersburg State University, Russia, St. Petersburg;

³Arctic and Antarctic Research Institute, Russia, St. Petersburg

spopov67@yandex.ru

Summary. This paper presents an overview of the results of remote sensing studies carried out in the Subglacial Lake Vostok area, East Antarctica. Systematic Russian investigations of this natural phenomenon was began in 1995 by ground-based radio-echo sounding and reflection seismic soundings. Special technique and equipment has been developed for this scientific research. The ice thickness over the lake Vostok area varies from 1950 to 4350 m. The area of water-table of the lake is 15.79 thousand sq. km. The lake is isolated. The average depth of the lake is about 400 m; the water volume is 6100 cubic km. There are 11 islands were revealed. Also outside the lake 56 isolated subglacial reservoirs have been detected. According to the seismic data, the bottom of Lake Vostok covered by sediments with the thickness of tens, perhaps the first hundreds of meters. Crystalline basement is under this layer.

Key words: *East Antarctica, geophysical investigations, Lake Vostok, radio-echo sounding, seismic soundings.*

Резюме. В настоящей работе представлен обзор результатов дистанционных исследований, выполненных в районе подледникового озера Восток (Восточная Антарктида). Систематические отечественные исследования озера начаты в 1995 г. путём проведения радиолокационных и сейсмических работ. Для этого была разработана специальная методика и аппаратура. Установлено, что мощность ледникового покрова над акваторией озера Восток изменяется от 1950 до 4350 м. Площадь водного зеркала озера составляет 15,79 тыс. км² и представляет собой изолированную систему. Средняя глубина озера составляет около 400 м, объём воды 6100 км³. В пределах акватории выявлено 11 островов, а вокруг озера 56 изолированных подледниковых водоёмов. Согласно сейсмическим данным, на дне озера Восток имеется осадочный чехол небольшой мощности: десятки, возможно, первые сотни метров, ниже которого располагаются породы кристаллического фундамента.

Ключевые слова: *Восточная Антарктида, геофизические исследования, озеро Восток, радиолокационные зондирования, сейсмические зондирования.*

Введение

Честь открытия Антарктиды принадлежит офицерам и матросам Российского флота. Именно они, путешествуя в Южной полярной области на двух шлюпах «Мирный», под командованием лейтенанта М.П. Лазарева, и «Восток», под командованием капитана Ф.Ф. Беллинсгаузена, 28 января (16 января по старому стилю) 1820 г. подошли к берегам нового континента (Беллинсгаузен, 1949; Белов, 1961, 1969). Шли годы. Миновал XIX век, принеся человечеству великие открытия в области физики и химии. Отгремели мировые войны. Через десять лет после самой кровавой из них, 13 февраля 1956 г. над первой отечественной антарктической станцией взвился государственный флаг Советского Союза (рис. 1, а). Это стало отправной точкой планомерных исследований нашей страной Южной полярной области. Станцию назвали Мирный, в честь одного из кораблей Первой русской антарктической экспедиции. Через полтора года, в ходе Второй комплексной советской антарктической экспедиции 16 декабря 1957 г. в районе Южного геомагнитного полюса была открыта станция Восток, символично названная в честь второго судна Первой русской антарктической экспедиции. С тех пор, на протяжении полувека, эти две станции, как некогда два корабля, снова вместе. Все эти долгие годы станция Восток обеспечивалась санно-гусеничными походами со станции Мирный рис. 1, б.

В 1970 г. на станции Восток началось керновое бурение (Vasiliev et al., 2007). В 1993 году в одном из известнейших гляциологических журналов появилась небольшая статья. В ней авторы, на основании анализа данных спутниковой альтиметрии, сделали вывод о наличии обширного подледникового водоёма, расположенного к северу от российской станции Восток (Ridley et al., 1993). Авторы назвали его по имени ближайшей станции. Так впервые в научной литературе появилось новое географическое наименование *Vostok lake* (озеро Восток).

Первый этап изучения: озеро Восток – географический объект

Обращая взор в прошлое, становится понятно, что уже в середине 1970-х годов имелось достаточно оснований считать, что к северу от станции Восток имеется подледниковый водоём значительных размеров. Ещё на заре изучения Антарктиды И.А. Зотиков предположил существование подобных объектов. Он связал их формирование с

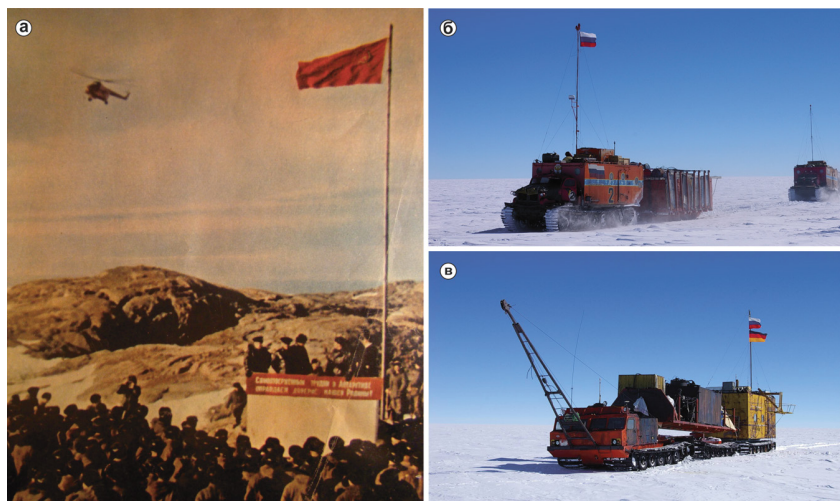


Рис. 1. Открытие обсерватории Мирный 13 февраля 1956 г. С обложки журнала "Огонек", июль 1956 г. (а), приход санно-гусеничного похода на станцию Восток со станции Мирный (б) и Передвижная геофизическая лаборатория «Витязь» (в). Фотографии С.В. Попова.

донным таянием и заполнением талой водой отрицательных формы подлёдного рельефа (Зотиков, 1961, 1963; Zotikov, 1963). Менее чем через десять лет после первой публикации, в декабре 1967 г. в ходе аэрорадиолокационных исследований недалеко от станции Советская были получены данные, свидетельствующие о наличии там подледникового водоёма (Robin et al., 1968). Последующее изучение внутренних районов Антарктиды привело к открытию множества подобных объектов. В настоящее время их насчитывается более четырёхсот (Wright, Siegert, 2012; Siegert, 2018), но озеро Восток выделяется среди них поистине грандиозными размерами (Попов, Черноглазов, 2011).

Первые надёжные геофизические данные о районе озера Восток получены в период 1958–1964 гг. в процессе сейсмо-гравиметрических исследований А.П. Капицы и О.Г. Сорохтина (Капица, 1960, 1966; Капица, Сорохтин, 1965). Но в процессе обработки данных слой, расположенный непосредственно под ледником, был принят за осадочный чехол. В ходе аэрорадиолокационных исследований 1971–1978 гг. к северу от станции Восток были зарегистрированы отражения, типичные для водных объектов (Kapitsa et al., 1996). Сейчас, по прошествии десятилетий, сложно разобраться, почему, несмотря на имеющиеся данные, мысль о существовании

огромного водоёма под антарктическим ледником не появилась раньше, и почему только в сводной публикации (Kapitsa et al., 1996) были обобщены радиолокационные и сейсмические материалы, однозначно указывающие на наличие подледникового водоёма протяжённостью около 250 км.

В 1995 г., практически сразу после первой публикации об открытии подледникового озера Восток, наша страна, в лице Российской антарктической экспедиции (РАЭ) и Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ), приступили к планомерному изучению этого уникального объекта. На начальном этапе исследований (1995–2008 гг.) предусматривалось совершенствование методики проведения геофизических работ и адаптация её к условиям чрезвычайно низких температур. В соответствии с логикой научных исследований, сначала озеро изучалось как географический объект, т.е. определялось положение его береговой линии и основных морфометрических характеристик. Для решения этих задач применялись дистанционные геофизические методы: сейсмические зондирования методом отражённых волн (МОВ, начиная с 1995 г.) и радиолокационное профилирование (РЛП, начиная с 1998 г.).

В ходе этого этапа был разработан ряд новых методических подходов и технических решений, связанных с выполнением полевых работ. В частности, для повышения эффективности сейсмических исследований стали использовать возбуждение линий детонирующего шнура, уложенного на снежной поверхности, вместо классического варианта заглубления заряда в глубокую скважину (Кондратьев, Гамбурцев, 1963). Причина заключается в мощном снежно-фирновом слое на поверхности антарктического ледника, в котором происходит активное затухание акустической волны. Оказалось, что хорошие результаты достигаются при использовании взрывов 5–6 линий детонирующего шнура длиной 50 м, которые укладывались на снежной поверхности (Попов и др., 2012а).

Для выполнения радиолокационных исследований имеющаяся радиолокационная аппаратура, применяющаяся для проведения аэрогеофизических работ, не годилась, поскольку не обеспечивала уверенную глубину зондирования до 2500–3000 м. Однако мощность ледника в районе озера Восток значительно превышала предельное значение. Таким образом, для выполнения радиолокационных исследований потребовалось разработать новый, более мощный ледовый локаатор РЛС-60-98. Он имел несущую частоту 60 МГц, частоту повторения зондирующих импульсов 600 Гц, длительность зондирующего импульса 0,6 мкс, мощность в импульсе 60 кВт, динамический

диапазон 180 дБ, полосу пропускания приёмного канала 3 МГц, шаг дискретизации эхосигнала по времени 50 нс, шаг дискретизации эхосигнала по амплитуде 0,24 мВ, количество накоплений оцифрованных эхосигналов 256 и частоту регистрации 0,5 Гц. Через несколько лет этот локатор был существенно модернизирован. Его мощность была доведена до 80 кВт в импульсе, и значительно улучшены технические характеристики платы аналогово-цифрового преобразования: шаг дискретизации эхосигнала по времени уменьшился до 25 нс. Разрядность обоих плат аналогово-цифрового преобразования – 12 бит.

Новый ледовый локатор получил наименование РЛС-60-06 (Попов и др., 2012б). В ходе работ в северной части озера Восток с помощью этого прибора было получено отражение от подледной поверхности, расположенной на глубине 4350 м, что является абсолютным рекордом для отечественной аппаратуры (Попов и др., 2012а). Технические характеристики и глубинность РЛС-60-06 ставят его в один ряд с лучшими зарубежными аналогами.

Полевые работы были организованы таким образом, чтобы радиолокационные зондирования обязательно проводилось по сейсмическим профилям, обеспечивая комплексность исследований. Работы выполнялись с использованием передвижной геофизической лаборатории «Витязь» (рис. 1, в). В разные годы этот комплекс дополнялся гляциологическими наблюдениями, которые проводили сотрудники отдела географии полярных стран АНИИ, а также высокоточными геодезическими измерениями, которые выполняли сотрудники Института планетарной геодезии Дрезденского технического университета (Германия).

Помимо важных научных достижений, которые частично изложены в работах (Richter et al., 2008, 2010, 2013, 2014; Попов и др., 2012а, 2012б; Екаукин et al., 2012; Владимирова и др., 2015), основной прикладной результат работ этого периода состоял в доказательстве того, что озеро Восток является замкнутым водоёмом, заключённым в каменных берегах (Попов, Черноглазов, 2011). Сейчас, по прошествии многих лет, это кажется само собой разумеющимся, но в те годы предположение об изолированности только предстояло доказать.

Следующим, не менее важным прикладным результатом, стало измерение мощности ледника от забоя скважины до поверхности озера с максимально высокой точностью. Это существенно повышало безопасность проникновения в него. С этой целью в скважине был выполнен специальный комплекс работ, который включал вертикальное сейсми-

ческое профилирование. Измерения показали, что средняя скорость распространения упругих волн в теле ледника непосредственно в пункте бурения составляет 3810 ± 20 м/с; в чистом атмосферном льду (пластовая скорость) она равна 3920 ± 20 м/с (Попков и др., 1999). Эти значения весьма важны, поскольку позволяют уверенно пересчитать временной разрез в глубинный не только для пункта бурения, но и для района в целом. Мощность ледника в пункте бурения по сейсмическим данным составила 3760 ± 30 м (Попков и др., 1999). Аналогичные измерения были выполнены для определения средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике методом общей глубинной точки (ОГТ). Согласно полученным данным, она составила $168,4 \pm 0,5$ м/мкс; мощность ледника в районе пункта бурения оценена 3775 ± 15 м (Попов и др., 2001; Popov et al., 2003). Таким образом, средняя мощность ледника по обоим дистанционным методам составляет 3768 м, что всего на четверть процента отличается от значения $3758,6 \pm 3$ м, полученного по результатам бурения после проникновения в озеро Восток (Lipenkov et al., 2016)!

На рубеже нового тысячелетия, в сезон 2000/2001 г., американские специалисты выполнили комплексную аэрогеофизическую съёмку района подледникового озера Восток. Работы включали магнитометрические, гравиметрические и радиолокационные исследования (Studinger et al., 2003). Указанные зарубежные и отечественные данные хорошо дополняли друг друга. Положение маршрутов приведено на рис. 2, а. На их основе с высокой точностью определена не только береговая линия озера Восток, но также получена детальная информация о мощности ледникового покрова, высоте подлёдного и коренного (с учётом дна озера) рельефа и глубине водоёма (рис. 2, б).

Выяснено, что площадь водного зеркала озера составляет 15,79 тыс. км². Его высотное положение изменяется от –600 до –150 м. На акватории выявлено 11 островов общей площадью 365 км². Площадь наибольшего из них 175 км². Кроме того, в этом районе обнаружено 56 изолированных подледниковых водоёмов, наибольший из которых характеризуется площадью 129 км². Мощность ледника над его акваторией изменяется в пределах от 3600 до 4350 м (Масолов и др., 2010; Попов и др., 2012а, 2012б). Полученные результаты позволили провести геоморфологический анализ: подразделить рельеф каменного основания на крупные и средние орографические формы, охарактеризовать их, выполнить морфометрический анализ, и выявить преобладающие простирания морфоструктур подлёдного рельефа (Попов, Лунёв, 2012).

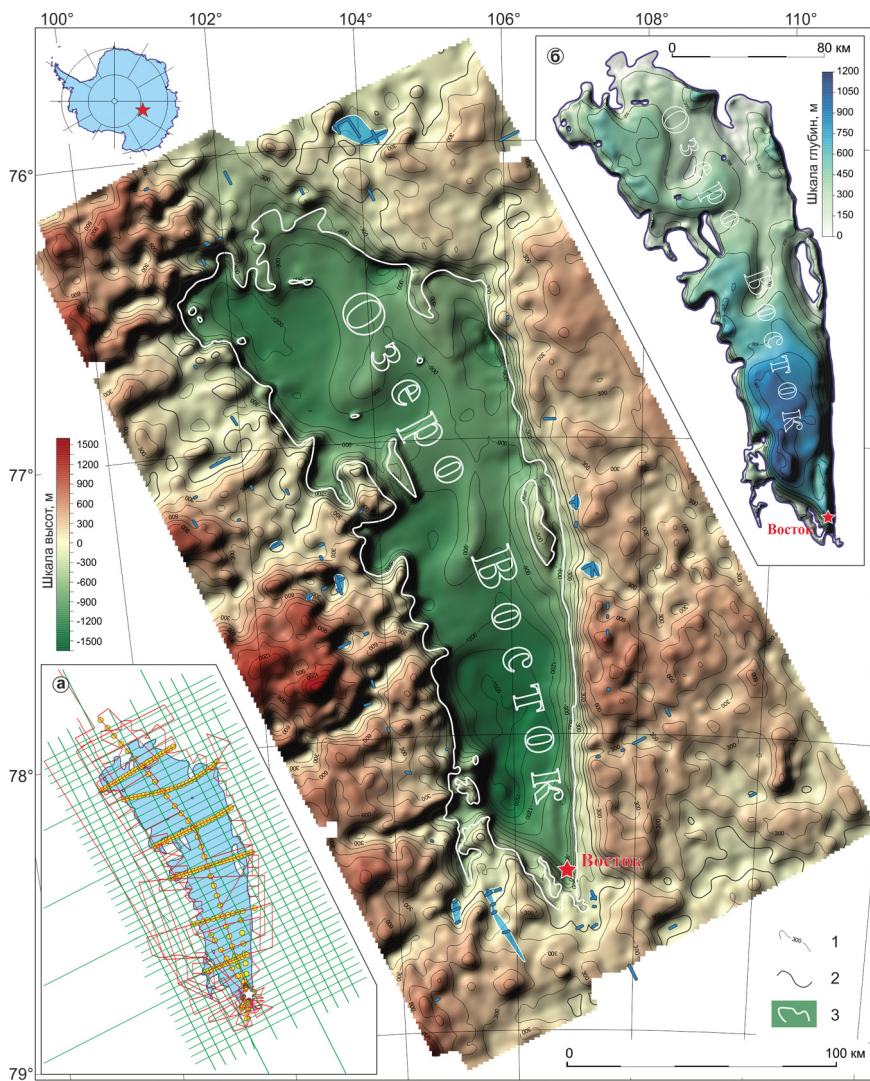


Рис. 2. Коренной рельеф района подледникового озера Восток
 На сечении *a* приведена схема расположения использованных геофизических данных; красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты; зелёным – маршруты американской съёмки; жёлтые точки – пункты сейсмических зондирований МОВ.
 На сечении *б* показаны глубины озера Восток; сечение изолиний 150 м. 1 – изогипсы коренного рельефа; сечение изолиний 150 м; 2 – уровень моря; 3 – береговая линия озера Восток; голубым цветом показаны подледниковые водоёмы

В 2008 г. этот важный этап геофизических исследований был завершён. Всего в ходе него выполнено 318 сейсмических зондирований МОВ и получено 5190 пог. км радиолокационных маршрутов (см. рис. 2, а). Всё это создало предпосылки для работ следующего этапа, направленного на изучение геологического строения региона.

Второй этап изучения: выяснение особенностей глубинного строения района

Если на первом этапе решались главным образом проблемы картирования и прикладные задачи, то на втором – научные. В ходе летнего полевого сезона 2002/03 г. в южной части озера Восток были проведены сейсмологические наблюдения методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ) для изучения особенностей глубинного строения района. Особенности проведения исследования и обработки данных изложены в работе (Исанина и др., 2009). В результате было установлено, что мощность земной коры составляет 34 км к западу от жёлоба Восток и 36 км к востоку от него. Кроме того, эти данные позволяют предположить увеличение геотермального потока в районе котловины Восток и к востоку от неё. Эти данные подтверждают высказанное предположение о том, что жёлоб, в котором располагается озеро, представляет собой фрагмент обширной позднепалеозойско-раннемезозойской рифтовой системы, простирающейся от ледника Ламберта вдоль подножия гор Гамбурцева в высокоширотную область внутренних районов континента (Лейченков и др., 2005; Ferraccioli et al., 2011; Лейченков, Попков, 2012).

Сейсмические исследования МОВ первого этапа, выполненные в южной части озера Восток, помимо измерения глубин, позволили оценить мощность осадочного чехла. Полученные в весьма непростых для интерпретации условиях узкого и глубокого жёлоба данные показывают, что осадки имеют небольшую мощность: десятки, возможно, первые сотни метров, и подстилаются породами кристаллического фундамента (Filina et al., 2008; Лейченков, Попков, 2012). Это свидетельствует о низкой скорости и/или коротком периоде седиментации, что противоречит предположениям о древнем заложении депрессии озера, поскольку в этом случае мощность терригенных отложений была бы значительно больше (Лейченков, Попков, 2012; Васильев и др., 2017).

В 2008 г., после завершения сейсмических работ МОВ, начался новый этап исследований, направленный на изучение глубинного стро-

ения верхней части земной коры района озера Восток посредством выполнения сейсмических зондирований методом преломленных волн (МПВ). За четыре полевых сезона отработано четыре профиля: два вдоль длинной оси жёлоба в его южной части (67 км и 58 км) и два к западу от озера (35 км и 60 км). В западной части по каждому из них получены данные по прямому и встречному годографу. Это позволило выяснить скоростные характеристики горных пород, слагающих ложе ледника. Оба профиля располагались в южной части района озера Восток. Первый из них проходил вдоль длинной оси жёлоба, а второй – субпараллельно первому на его западном борту. Протяжённость профилей составляла от 35 до 67 км (Leitchenkov et al., 2016).

Упругие колебания возбуждались взрывами на поверхности ледника точечных зарядов массой от 10 до 1500 кг, рассредоточенных в створе профиля наблюдения вдоль одной линии детонирующего шнура. Отказ от классического подхода к изучению геологических структур, который подразумевает ориентирование маршрутов съёмки в крест их протирания, связан с тем, что борта жёлоба, в котором располагается озеро Восток, крутые. В связи с этим, вблизи них возникает множество волн-помех, маскирующих целевые границы, и затрудняющих интерпретацию данных. Описание методики выполнения полевых работ, а также особенностей обработки интерпретации сейсмических данных приведено в работах (Попов и др., 2012а; Leitchenkov et al., 2016).

Данные МПВ показывают, что истинная скорость преломлённых волн в породах, слагающих дно озера, составила 6,0–6,2 км/с, что соответствует породам кристаллического фундамента. С другой стороны, полученные материалы не исключают наличие относительно маломощного низкоскоростного (со скоростью менее 3,8 км/с), или промежуточного (со скоростью от 3,8 км/с до 6,2 км/с) слоя, который соответствует осадочному чехлу разной степени консолидации. На сейсмическом профиле, расположенном за пределами озера, скорость упругих волн составила около 6,2 км/с, что соответствует породам кристаллического фундамента и свидетельствует о практическом отсутствии осадочного чехла (Leitchenkov et al., 2016).

Заключение

В самом конце летнего полевого сезона 57-й РАЭ на станции Восток произошло знаменательное событие: 5 февраля 2012 г. буровой снаряд скважины 5Г достиг поверхности и проник в воды самого

большого из известных подледниковых водоёмов на нашей планете озера Восток (Лукин, 2012). Этого события ждали долгие годы. Ему предшествовала долгая и кропотливая работа не только сотрудников кафедры бурения Санкт-Петербургского горного университета, тех, чьими руками и было осуществлено проникновение в озеро, но и геофизические исследования, которые, вовремя предоставив необходимую информацию, внесли свой посильный вклад в это важное дело.

За последние десятилетия станция Восток пережила много невзгод, связанных с её консервацией и недостатком топлива. Но сейчас её ждёт возрождение. Уже в этом году придут первые конструкции, предназначенные для строительства новых корпусов станции. Это, по истине, символично, что придут они на станцию в двухсотлетний юбилей швартовки шлюпа «Восток» к берегам Антарктиды.

Благодарности. Авторы благодарят П.И. Лунёва за рекомендации и ценные замечания. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-55-12003 ННИО.

Литература

- Беллинсгаузен Ф.Ф.* Двукратные изыскания в Южном Ледовитом океане и плавание вокруг света в продолжение 1819, 20 и 21 годов. М.: Географгиз, 1949. 358 с.
- Белов М.И.* История открытия и исследования Антарктики. Атлас Антарктики, т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 35–96.
- Белов М.И.* Отчетная карта первой русской антарктической экспедиции // Бюлл. Советской Антарктич. экспедиции. 1961. № 31. С. 5–14.
- Васильев Н.И., Лейченко Г.Л., Загивный Э.А.* Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток // Зап. Горного института. 2017. Т. 224. С. 199–208. doi: 10.18454/PMI.2017.2.199.
- Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Шибанов Ю.А.* Пространственная изменчивость скорости накопления и изотопного состава снега в Индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, включая район подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 69–86.
- Зотиков И.А.* О температурах в толще ледников Антарктиды // Антарктика. 1963. С. 61–105.

- Зотиков И.А. Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды // Бюлл. Советской Антарктической экспедиции. 1961. Вып. 28. С. 16–21.
- Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений // Геотектоника. 2009. № 3. С. 45–50.
- Капица А.П. Новые данные о мощности ледникового покрова центральных районов Антарктиды // Бюлл. Советской Антарктич. экспедиции. 1960. Т. 19. С. 10–15.
- Капица А.П. Рельеф ледникового покрова и подледного ложа Антарктиды // Бюлл. Советской Антарктич. экспедиции. 1966. № 58. С. 5–12.
- Капица А.П., Сорохтин О.Г. Измерения толщины ледникового покрова в походе по маршруту Восток – Молодежная // Бюлл. Советской Антарктич. экспедиции. 1965. Т. 51. С. 19–23.
- Кондратьев О.К., Гамбурцев А.Г. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М.: Изд. АН СССР, 1963. 211 с.
- Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С.В. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. // Материалы гляциол. исследований. 2005. Вып. 98. С. 81–91.
- Лейченко Г.Л., Попков А.М. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 21–30.
- Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 91. № 1. 2012. С. 5–19.
- Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М. Характер рельефа дна и водного тела подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 693–698.
- 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. исследований. 1999. Вып. 86. С. 152–159.
- Попов С.В., Лунёв П.И. Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 81–92.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012, а. Т. 52. № 4. С. 31–38. doi: 10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.

- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Результаты отечественных дистанционных исследований подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Разведка и охрана недр. № 8. 2012, 6. С. 46–50.
- Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучининов В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // Материалы гляциол. исследований. 2001. Вып. 90. С. 206–208.
- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы // Лёд и Снег. 2011. № 1. С. 13–24.
- Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A. Spatial distribution of the snow accumulation rate along the ice flow lines between Ridge B and Lake Vostok // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 122–128.
- Ferraccioli F., Finn C.A., Jordan T.A., Bell R.E., Anderson L.M., Damaske D. East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains // Nature. 2011. V. 479. P. 388–394.
- Filina I.Y., Blankenship D.D., Thoma V., Lukin V.V., Masolov V.N., Sen M.K. New 3D bathymetry and sediment distribution in Lake Vostok: Implication for pre-glacial origin and numerical modeling of the internal processes within the lake // EPSL. 2008. V. 276. P. 106–114.
- 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. V. 381. № 6584. P. 684–686.
- Leitchenkov G.L., Antonov A.V., Luneov P.I., Lipenkov V.Ya. Geology and environments of subglacial Lake Vostok // Philos. Transactions of the Royal Society. Ser. A. 2016. V. 374. № 2059. P. 20140302. doi: 10.1098/rsta.2014.0302.
- 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. V. 374. P. 20140303. doi: 10.1098/rsta.2014.0303.
- Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol. 2003. V. 49. № 165. P. 179–183.
- Richter A., Fedorov D.V., Dvoryanenko A.K., Popov S.V., Dietrich R., Lukin V.V., Matveev A.Yu., Fritsche M., Grebnev V.P., Masolov V.N. Observation of ice-flow vectors on inner-continental traverses in East Antarctica // Лёд и Снег. 2010. № 1. С. 30–35.

- 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 Vostok Subglacial Lake, East Antarctica, determined by 10 years of GNSS observations // *J. Glaciol.* 2013. V. 59. № 214. P. 315–326. doi: 10.3189/2013JoG12J056.
- Richter A., Fedorov D.V., Fritsche M., Popov S.V., Lukin V.V., Matveev A.Yu., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Schröder L., Dietrich R. Height changes over subglacial Lake Vostok, East Antarctica: Insights from GNSS observations // *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface.* 2014. V. 119. № 11. P. 2460–2480. doi: 10.1002/2014JF003228.
- Richter A., Popov S.V., Dietrich R., Lukin V.V., Fritsche M., Lipenkov V.Y., Matveev A.Y., Wendt J., Yuskevich A.V., Masolov V.N. Observational evidence on the stability of the hydroglaciological regime of subglacial Lake Vostok // *Geophys. Research Letters.* 2008. V. 35. L. 11502. doi: 10.1029/2008GL033397.
- Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *Journ. of Glaciology.* 1993. V. 73. № 133. P. 625–634.
- Robin G.Q., Swithinbank C.W.M., Smith B.M.E. Radio echo sounding of the Antarctic ice sheet // *ISAGE Symposium.* Hanover, USA, 3–7 September 1968, P. 97–102.
- Siegert M.J. A 60-year international history of Antarctic subglacial lake exploration // *Geol. Society London. Spec. Publ.* 2018. V. 461. № 1. P. 7–21. doi: 10.1144/SP461.5.
- Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *EPSL.* 2003. V. 205. P. 195–210.
- Vasiliev N.I., Talalay P.G., Bobin N.E., Chistyakov V.K., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Dmitriev A.N., Yankilevich S.V., Lipenkov V.Ya. Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events // *Ann. Glaciol.* 2007. № 47. P. 10–23.
- Wright A., Siegert M.J. A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes // *Antarctic Science.* 2012. V. 24. № 6. P. 659–664. doi: 10.1017/S095410201200048X.
- Zotikov I.A. Bottom melting in the central zone of the ice shield on the Antarctic continent and its influence upon the present balance of the ice mass // *Bull. Intern. Assoc. Scient. Hydrology.* 1963. V. 8. № 1. P. 36–44.