

УДК: 913.1/913.8

## РЕЛЬЕФ ДНА И ВОДНОЕ ТЕЛО ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

© 2010 г. В. Н. Масолов, С. В. Попов, В. В. Лукин, А. М. Попков

Представлено академиком В.М. Котляковым 01.12.2009 г.

Поступило 18.12.2009 г.

В начале 1990-х годов в ходе анализа данных спутниковой альтиметрии к северу от российской станции Восток была обнаружена плоская субгоризонтальная ледяная равнина и высказано предположение, что она приурочена к положению аналогичной по площади водной поверхности [1]. Летом 1994 г. на сессии Научного комитета по антарктическим исследованиям в г. Риме А.П. Капица сделал сообщение о расположении в данном районе большого подледникового пресноводного озера, которое предлагалось назвать озером Восток. Практически сразу после этого, в 1996 г., данное обстоятельство было всесторонне проанализировано и сопоставлено с ранее полученными сейсмическими и радиолокационными данными. Это, в свою очередь, позволило уже более обосновано утверждать о возможности существования подобного природного феномена. В это же самое время, начиная с сезона 1995–1996 гг., началось активное и планомерное изучение этого объекта Полярной морской геологоразведочной экспедицией в составе ежегодных Российских антарктических экспедиций. Исследования проводились дистанционными геофизическими методами: посредством наземного радиолокационного профилирования (РЛП) и сейсмическими зондированиями методом отраженных волн (МОВ). Последние осуществлялись преимущественно над акваторией озера [2–4]. Несмотря на то, что к настоящему времени открыто более двухсот подобных объектов [5], оз. Восток является самым значительным и наиболее изученным из них.

В ходе первого этапа отечественных исследований (1995–2001 гг.) были разработаны уникальные методические подходы, позволяющие получать качественные сейсмические данные. Суть

проблемы состояла в том, что принципиальная сложность проведения подобных работ во внутренних районах Антарктиды заключается в наличии значительного (100 м и более) снежно-фирнового слоя, в котором происходит затухание акустической волны от активных искусственных источников. Многочисленные исследования, выполненные ранее в 1950–1980 гг. во внутриконтинентальных санно-гусеничных походах, показали, что при продвижении в глубь материка увеличивается интенсивность поверхностных волн-помех. Они возникают после взрыва в снежно-фирновом слое, характеризуются значительной интенсивностью и слабым затуханием. Был сделан вывод, что для уверенной регистрации целевых границ в центральных районах Антарктиды требуется возбуждение волн в скважинах на глубинах более 30 м [6]. Для выполнения планомерных сейсмических работ по изучению подледникового оз. Восток указанный метод неприменим ввиду своей трудоемкости при относительно короткой продолжительности летнего полевого сезона (1,5–2 мес.) в этом районе. В связи с этим в 1995–1997 гг. проведены опытно-методические работы, направленные на создание новой методики полевых сейсмических наблюдений. Они показали, что удовлетворительные результаты достигаются при использовании взрывов 5–6 линий детонирующего шнура (плотностью 40 г/м и длиной 75 м каждая), который располагается на снежной поверхности [7].

Следующим крайне важным научным результатом этого этапа стало инструментальное подтверждение наличия водного слоя в районе ст. Восток. Для этого были проведены специальные сейсмические исследования, доказывающие, что подледная среда является не чем иным, как водным телом. Кроме того, в глубокой ледяной скважине 5Г-1, расположенной на ст. Восток, было выполнено вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) с целью определения акустических параметров ледника, что существенно увеличило точность всех последующих измерений. Работы показали, что средняя скорость распространения в нем упругих волн составляет

*Полярная морская геологоразведочная экспедиция,  
Санкт-Петербург*

*Арктический и антарктический  
научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург*

*Российская антарктическая экспедиция,  
Санкт-Петербург*

$3810 \pm 20$  м/с; скорость в чистом ледниковом льду атмосферного происхождения (пластовая скорость) составляет  $3920 \pm 20$  м/с. По данным ВСП была определена мощность ледника от забоя скважины до поверхности озера. На момент проведения работ она составила 130 м от глубины забоя 3623 м [3].

С аналогичной целью, для повышения точности радиолокационных исследований, в сезон 1999/2000 гг. в районе ст. Восток выполнено определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике методом наклонных зондирований. Исследования показали, что она составляет  $168.4 \pm 0.5$  м/мкс. Сравнение результатов сейсмических и радиолокационных измерений мощности ледника показали, что расхождение между ними вполне удовлетворительное.

В ходе первого этапа отечественных исследований подледникового оз. Восток было в целом описано и в генеральном плане определена его береговая линия. Согласно полученным данным, ее протяженность составляет 1030 км, включая 70 км, приходящиеся на острова; площадь водного зеркала составляет 15.5 тыс. км<sup>2</sup>, исключая 70 км<sup>2</sup> территории островов. Было выяснено, что водное зеркало располагается на абсолютных высотах приблизительно от –800 м в северной части до –200 м в южной по отношению к уровню моря. Его уклон составляет около 0.12°. На момент исследований это был первый в своем роде подобный объект: водный резервуар с наклонной верхней поверхностью. В свое время обсуждение этого факта сопровождалось множеством дискуссий.

В 2008 г. завершился второй этап отечественных исследований этого района: были закончены комплексные сейсмические и радиолокационные исследования, направленные на картирование дна озера и его бортов. Настоящая работа посвящена изложению результатов этого этапа исследований.

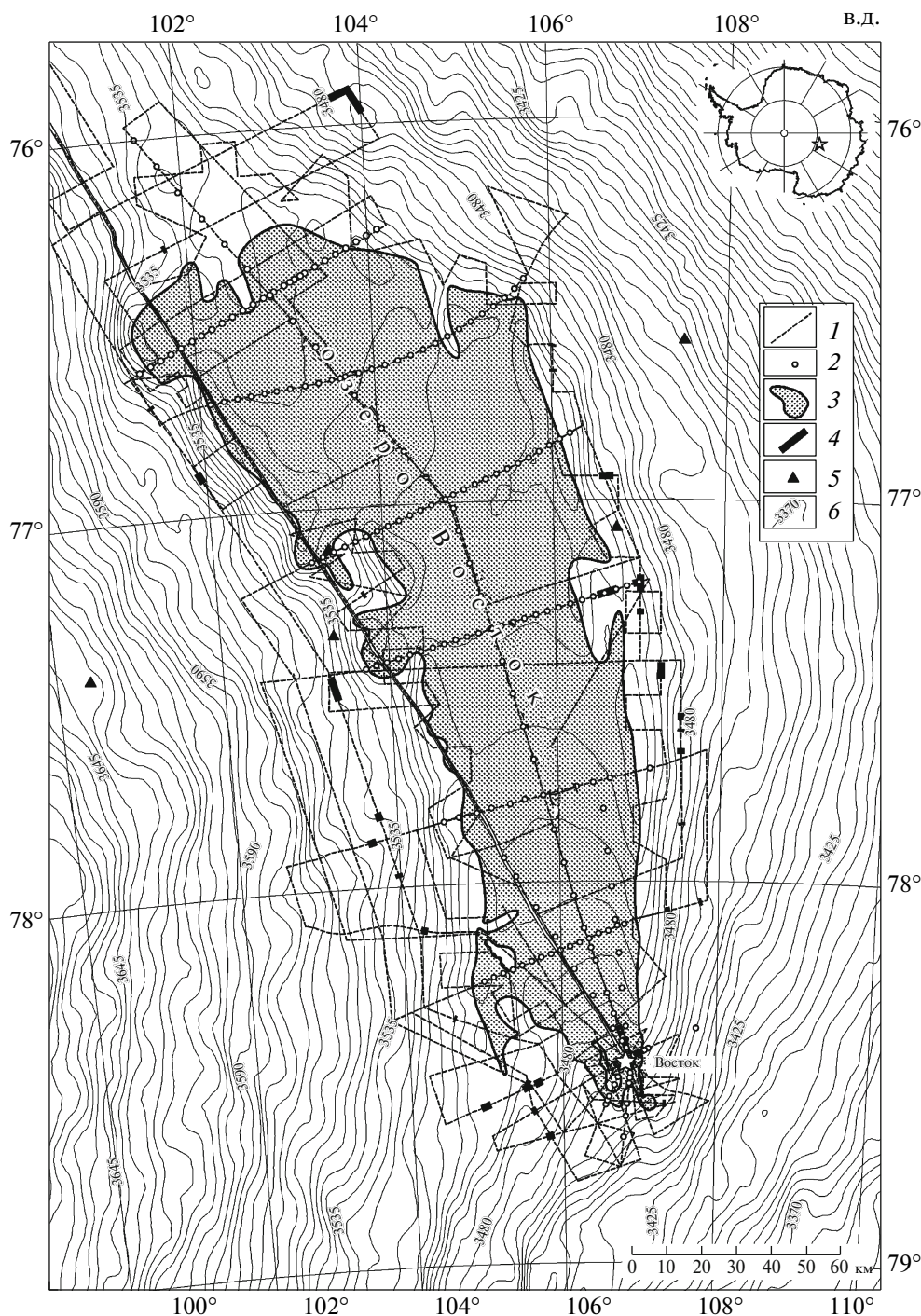
Первые представления о рельефе ложа ледника обсуждаемого района относятся к 1960–1970 гг. Они нашли свое отражение в картах коренного рельефа, вошедших в первый атлас Антарктики, изданный в Советском Союзе [8, с. 66] и более позднем уточненном варианте [9]. На них этот район представлен равнинной областью, расположенной выше уровня моря; в [9] она осложнена двумя котловинами незначительной глубины, расположенными в южной и северной частях. Эта ситуация вполне объяснима, поскольку до начала планомерных региональных исследований представления об этом районе складывались из весьма немногочисленных данных, полученных в ходе отечественных наземных исследований по маршруту обсерватория Мирный–станция Восток [10] и англо-американских аэрогеофизических исследований, выполненных в 1971–1972 гг.

К моменту завершения второго этапа исследований района подледникового оз. Восток было выполнено в общей сложности 318 сейсмических (МОВ) зондирований и выполнено 5190 пог. км радиолокационных маршрутов. Схема расположения указанных геофизических работ приведена на рис. 1. Толщина водного тела определялась посредством сейсмических измерений. Мощность ледника ввиду удовлетворительной сходимости сейсмического и радиолокационного методов определялась по радиолокационным данным. Дневная поверхность (для расчетов положения подледной поверхности и поверхности дна озера) была построена по данным наиболее современной лазерной альтиметрии спутника ICESat.

Как следует из рис. 2, средняя толщина водного слоя подледникового оз. Восток составляет около 410 м; объем водного тела составляет около 6343 км<sup>3</sup>. В генеральном плане оно подразделяется на две неравные по размерам части. Первая из них (южная) является наиболее глубоководной, но меньшей по размеру. Она занимает территорию приблизительно  $70 \times 30$  км. Преимущественные толщины водного слоя здесь составляют около 800 м. Вторая часть (северная) является относительно мелководной. Она занимает территорию приблизительно  $180 \times 60$  км. Средняя толщина водного слоя – около 300 м. График на врезке к рис. 2 наглядно показывает связь между толщинами водного слоя оз. Восток и площадью, которую занимают эти области. На графике имеются два ярко выраженных пика; оба соответствуют преимущественным толщинам водного слоя мелководной части озера.

Рассмотренные выше толщины водного слоя оз. Восток полностью находят свое отражение в рельефе дна. Он представлен на рис. 3. Комплекс геоморфологических признаков (крутые, более 15°, склоны котловины, их значительная высота, местами превышающая 1500 м, при значительном ее размере, около  $310 \times 100$  км) указывает на приуроченность этой структуры к глубинному разлому, а также на относительно молодой в геологическом отношении его возраст. Кроме того, с позиций геоморфологической терминологии эту структуру правильнее называть желобом (“длинная и узкая впадина с крутыми склонами” [11]) нежели котловиной (“впадина округлых или почти округлых очертаний” [11]), поскольку соотношение ее длины и ширины более чем 3:1.

Придонная часть желоба Восток в целом представляет собой холмистую равнину со средней абсолютной высотой около –900 м. Относительные превышения, по всей видимости, весьма незначительные и не превышают 100 м при максимальных уклонах до 4°. Холмистая равнина занимает территорию около 5800 км<sup>2</sup>, что составляет более трети всей территории (см. рис. 3). Первый пик на графике частотной зависимости высот рельефа

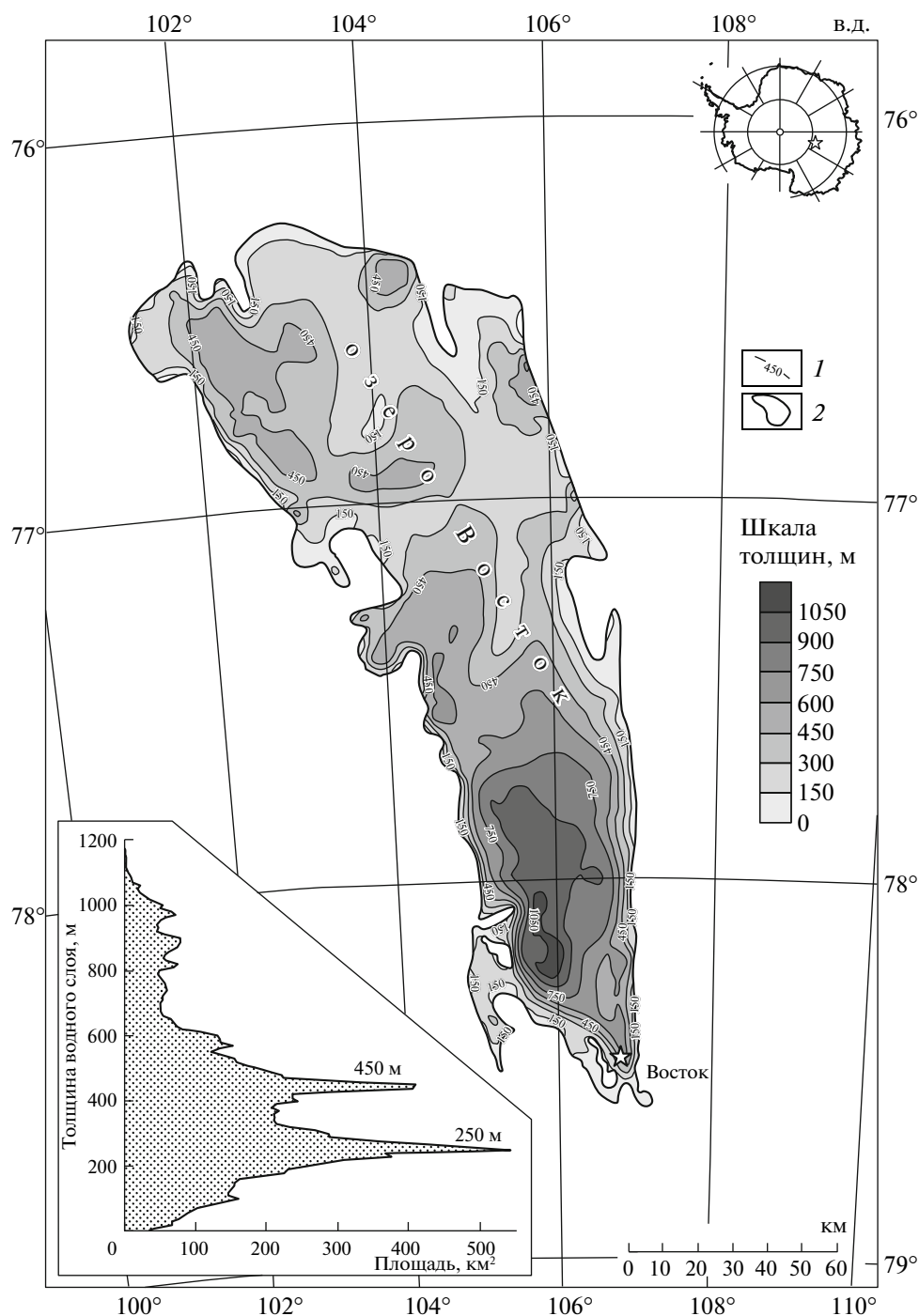


**Рис. 1.** Современные наземные геофизические исследования и мощность ледникового покрова в районе подледникового оз. Восток. 1 – маршруты РЛП; 2 – пункты сейсмических зондирований МОВ; 3 – береговая линия озера Восток по отечественным данным; 4 – фрагменты подледниковых водоемов, выявленных в ходе отечественных исследований; 5 – фрагменты подледниковых водоемов; 6 – изогипсы высот дневной поверхности, м; сечение изолиний 5 м.

дна оз. Восток от занимаемой ими площади (врезка на рис. 3) соответствует именно этой области.

В южной и северо-западной частях желоба Восток имеются две ярко выраженных в рельефе котловины. Первая из них наиболее глубокая и наибольшая по размерам (приблизитель-

но  $60 \times 30$  км). Ее глубина составляет около 400 м при средней крутизне склонов около  $8^\circ$ . Придонная часть котловины уплощенная и располагается на абсолютных высотах около  $-1500$  м. Именно этой области соответствует третий пик на графике (врезка на рис. 3). Кру-



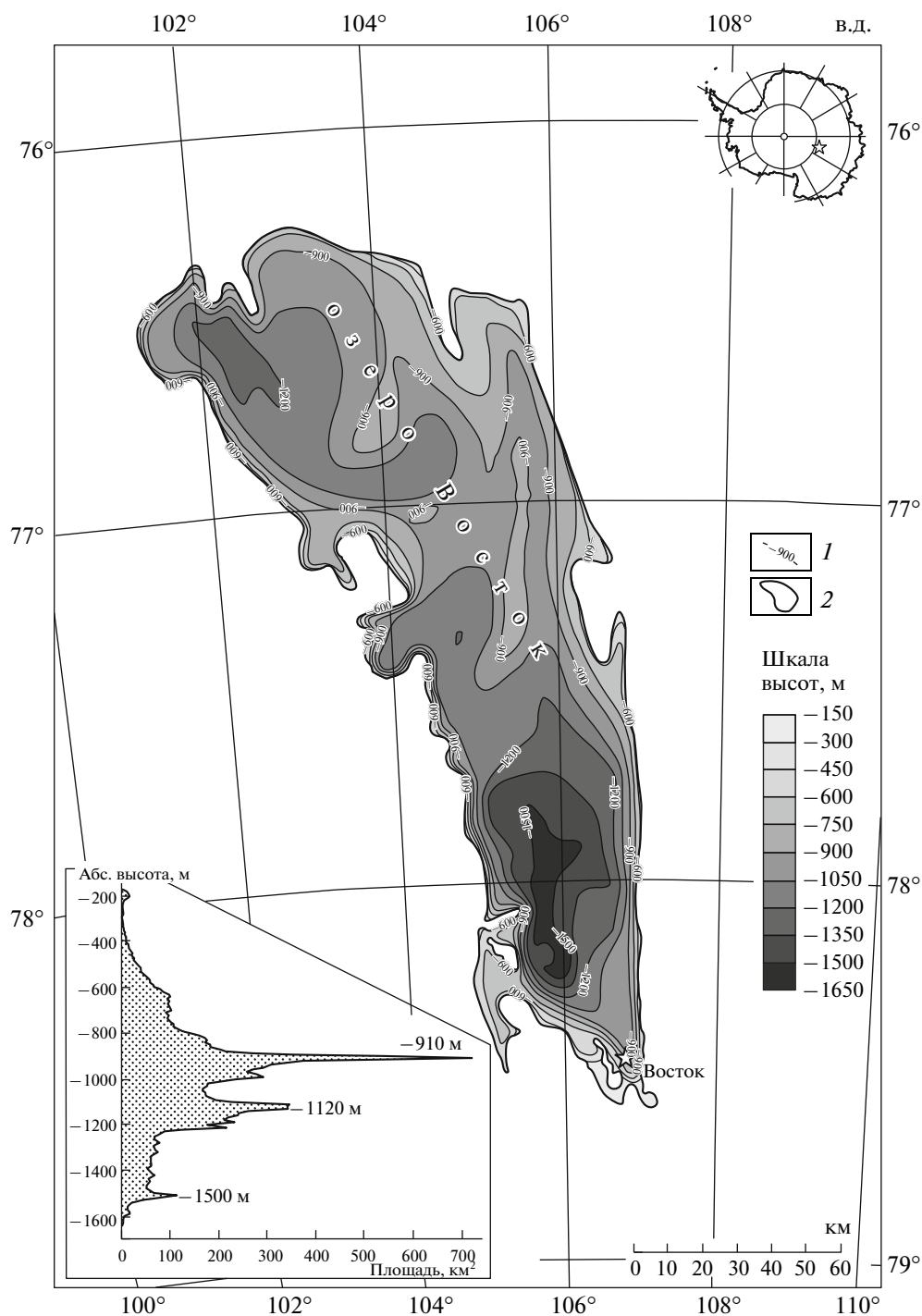
**Рис. 2.** Толщины водного слоя подледникового оз. Восток. 1 — изолинии толщин водного слоя оз. Восток, м, сечение изопакит 150 м; 2 — береговая линия оз. Восток по отечественным данным. На врезке — частотная зависимость толщин водного слоя озера Восток, от занимаемой площади.

тизна склонов указывает на тектонический генезис этой структуры.

Вторая котловина характеризуется размерами около  $45 \times 15$  км. Относительные превышения и уклоны также незначительны. Придонная часть котловины располагается на абсолютных высотах

около  $-1150$  м, чему соответствует второй пик на графике.

Завершая описание рельефа дна и толщин водного слоя подледникового оз. Восток, необходимо отметить, что расчеты толщин водного слоя озера и абсолютных высот его придонной части выполнялись и ранее американскими коллегами



**Рис. 3.** Коренной рельеф дна оз. Восток. 1 — изогипсы коренного рельефа дна, м, сечение изолиний 150 м; 2 — береговая линия оз. Восток по отечественным данным. На врезке — частотная зависимость абс. высот коренного рельефа дна оз. Восток от занимаемой площади.

по гравиметрическим данным [12]. Главное отличие обсуждаемой работы от указанных построений состоит в том, что они составлены на основе анализа именно прямых натурных наблюдений и, следовательно, в большей степени, чем результаты математического моделирования с ис-

пользованием косвенных геофизических данных, приближают нас к пониманию истинного характера коренного рельефа и толщин водного слоя оз. Восток.

Вопросу изолированности подледниковых антарктических водоемов и, в частности, оз. Восток

придается большое значение в связи с обсуждением методик проникновения в него в самое ближайшее время. Беспокойство научной общест­венности связано с обнаружением явления катастрофических подледниковых паводков [13, 14]. На сегодняшний день зарегистрировано более 200 относительно небольших (до нескольких десятков километров в длину) подледниковых озер [5], и с каждым годом их количество становится все больше и больше. Для подавляющего большинства из них не имеется сведений о характере береговой линии и объеме водных тел.

В ходе отечественных исследований вокруг оз. Восток были обнаружены многочисленные небольшие подледниковые водоемы [5]. К 2008 г. здесь насчитывалось 37 подобных объектов, 32 из которых были выявлены в ходе отечественных радиолокационных исследований последних лет (см. рис. 1). Линейные размеры водоемов составляют в среднем около 5 км [5]. В ходе специальных исследований обнаружен протяженный узкий фиорд, расположенный в южной части озера. Его длина составляет около 20 км [5]. Тем не менее многочисленные как отечественные, так и зарубежные исследования указывают на то, что оз. Восток в данный момент изолировано от других подобных объектов. В частности, в 2000 г. американскими учеными в этом районе была выполнена аэрогеофизическая съемка [15]. Рядовые маршруты располагались через 7.5 км. При этом ни отечественные данные, ни материалы наших американских коллег не указывают на наличие дренажной системы оз. Восток. Кроме того, выявленные подледниковые водоемы, расположенные вокруг оз. Восток, находятся выше уровня его водного зеркала. Таким образом, даже если бы они и соединялись протоками (что противоречит всем имеющимся данным), вода будет стекать в озеро, а не наоборот – вытекать из него. Кроме того, исследования показали, что водное тело оз. Восток полностью располагается в желобе коренных пород и при этом поверхность озера располагается ниже уровня моря. Последнее также косвенно свидетельствует о его изолированности. Таким образом, беспокойство научной общественности, связанное с возможным загрязнением антарктических подледниковых озер при проникновении в оз. Восток через глубокую ледяную скважину на ст. Восток за счет возникновения катастрофических паводков из него, с нашей точки зрения безосновательны.

Тем не менее обсуждаемый вопрос носит принципиальный характер как с позиций фундаментальной науки, так и из практических соображений (и, прежде всего, ввиду проникновения в озеро в недалеком будущем). Авторы полагают, что детальный геоморфологический анализ подледной поверхности сможет однозначно ответить на вопрос, имели ли место в недалеком прошлом катастрофические паводки оз. Восток. Если по-

добные события происходили, то они должны были сформировать протяженное русло как следствие значительной энергии водного потока.

То обстоятельство, что нет прямых указаний на наличие дренажной системы, отнюдь не свидетельствует об отсутствии колебаний уровня озера. Совершенно естественно, что его глубина не оставалась постоянной. В ходе кайнозойского орогенного этапа и гляциации этого региона желоб Восток и окружающее его горное обрамление претерпевали изменения, что отражалось на количестве воды в озере. Однако этот вопрос не имеет отношения к паводкам, поскольку эти явления отражают различные природные механизмы.

Полученные данные позволяют создать принципиально новое представление о структуре данного природного феномена и указать на его неординарность и принципиальное отличие от всех существующих подледниковых водоемов Антарктиды.

Работа выполнялась в рамках проекта 2 подпрограммы “Антарктика” ФЦП “Мировой океан”, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант 07–05–00401а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. // J. Glaciol. 1993. V. 73. № 133. P. 625–634.
2. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V. et al. Contributions to Global Earth Sciences. B.; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2006. P. 135–140.
3. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. // ДАН. 2001. Т. 379. № 5. С. 680–685.
4. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. // Материалы гляциол. исследований. 2007. В. 103. С. 107–117.
5. Popov S.V., Masolov V.N. // J. Glaciol. 2007. V. 53. № 181. P. 289–297.
6. Каница А.П., Сорохтин О.Г. // Бюл. САЭ. 1965. Т. 51. С. 19–23.
7. Popkov A.M., Kudryavtsev G.A., Shumilov V.A., Kondratiev N.V. International Workshop. March 24–26, 1998. AARI. St. Petersburg, 1998. P. 28.
8. Атлас Антарктики / Под ред. В.Г. Бакаева, Д.И. Щербакова, Е.И. Толстикова. М.; Л.: ГУГК, 1964. 238 с.
9. Короткевич Е.С., Кобленц Я.П., Косенко Н.Г. Карта коренного рельефа Антарктиды 1: 10 000 000. М.: Союзморниипроект, 1975.
10. Каница А.П. // Бюл. САЭ. 1966. № 58. С. 5–12.
11. Геологический словарь / Под ред. К.Н. Паффенгольца. М.: Недра, 1973. Т. 1. 488 с.
12. Studinger M., Bell R.E., Tikku A.A. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L12401. doi:10.1029/2004GL019801.
13. Clarke G.K.C. // Nature. 2006. V. 440. P. 1000–1001.
14. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. // Nature. 2006. V. 440. P. 1033–1036.
15. Studinger M., Bell R., Karner G.D. et al. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2003. V. 205. P. 195–210.