

Динамика поверхности над подледниковыми озёрами Антарктиды

© 2012 г. В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, А.Б. Качалин, М.Ю. Москалевский, А.С. Тюфлин

Институт географии РАН, Москва

leonid-vasiliev@yandex.ru

Статья принята к печати 7 июля 2012 г.

Антарктида, поверхность ледника, подледниковые озёра.
Antarctica, subglacial lakes, ice surface.

Прогресс в понимании каскадов подледниковых озёр в Антарктиде и динамики их поверхности обязан проведению космических лазерных альтиметрических измерений ICESat. Морфологические и динамические признаки индицируют подледниковые озёра и положение их береговой линии. Колебания поверхности в переходных зонах периодичны, а изменения высот поверхности над подледниковыми озёрами носят случайный характер. Поведение поверхностей над каскадами подледниковых озёр в Антарктиде и их переходными зонами подобны. С технологической точки зрения работа обосновывает методику картографирования подледниковых озёр по лазерным космическим измерениям высот поверхности.

Введение

Подледниковая среда Антарктиды — мало исследованный природный комплекс. Проверка гипотезы, предполагающей, что активные гидрологические системы соединяют подледниковые озёра и определяют динамику ледникового покрова, вполне реальна при использовании радиолокационных, сейсмических и альтиметрических измерений. Частично решение этой задачи связано с пониманием роли активных подледниковых озёр, их временной изменчивости, динамики ледяных потоков и баланса масс [1]. К настоящему времени в Антарктиде обнаружено около 280 подледниковых озёр. Все они идентифицированы с помощью радиоэхозондирования. Значительное число публикаций посвящено анализу колебаний поверхности над подледниковыми озёрами, в том числе с использованием Ice, Cloud and land Elevation Satellite (ICESat) [2, 3, 5, 6, 8]. Однако происхождение озёр и их взаимодействие не ясны до сих пор [9].

Движение ледниковых масс в выводных ледниках и ледниковых потоках вдоль склонов над подледниковыми озёрами сопровождается образованием поверхности с устойчивыми морфологическими признаками в переходных зонах. В этих зонах при сходе с ледникового ложа на водную поверхность и обратно последовательно формируются траншеи (понижения) и валики (вздутия). Аналитического описания образования подобной поверхности нет, но удовлетворительное приближение получено при помощи термомеханической модели [7]. Переходные зоны определяют положение береговой линии подледникового озера, ширина которой составляет

1,5–3 км. Флуктуации поверхности над подледниковыми озёрами сопровождаются их деформацией и колебаниями высот в переходных зонах с амплитудами более 2 м. Высокочастотные колебания в переходных зонах могут быть связаны с неравномерным движением ледника поперёк линии налегания. В результате частота колебаний поверхности в переходных зонах возрастает. В ряде случаев эти колебания характеризуются периодичностью. Таким образом, поведение поверхностей над подледниковыми озёрами в частотном пространстве резко отличается от их поведения в переходных зонах.

Сочетание морфологических признаков поверхности над подледниковыми озёрами и динамических процессов в переходных зонах позволяет выделить устойчивые индикационные признаки для обнаружения подледниковых озёр. Эти индикационные признаки подтверждены при исследованиях на озёре Восток [2–4] и в озёрах бассейна Рекавери, обнаруженных методами радиоэхозондирования.

Флуктуации поверхности над озером Восток

Изменения поверхности над оз. Восток определены по измерениям высот с помощью космической системы ICESat, запущенной на околоземную орбиту в январе 2003 г. на высоту 600 км с наклоном орбиты 94°, которая обеспечивает покрытие между 86° с.ш. и 86° ю.ш. Высоты поверхности измерялись лазерным альтиметром GLAS в ближней инфракрасной области при длине волны 1064 нм. Лазерный луч покрывает на ледовой поверхности пятно диаметром 50 м. Последовательность измерений вдоль про-

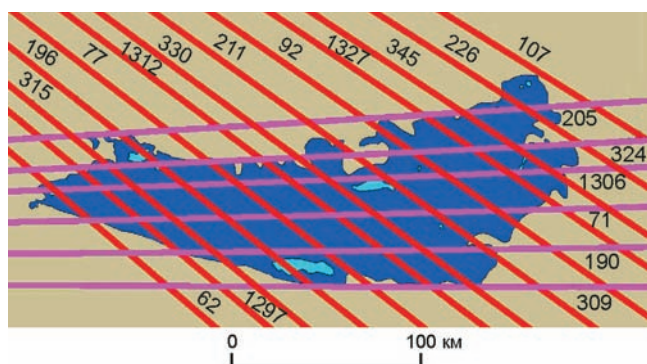


Рис. 1. Контур береговой линии оз. Восток и покрытие треками ICESat

Fig. 1. Shoreline of Lake Vostok and ICESat tracks coverage

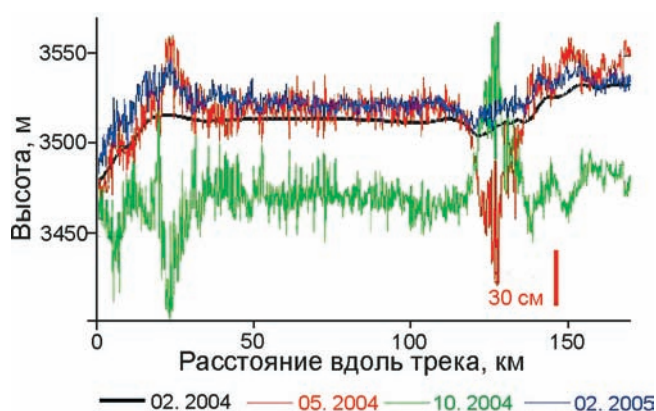


Рис. 2. Колебание высот поверхности над оз. Восток вдоль трека 330.

Координаты переходных зон — 22 и 125 км. Выделяются переходные зоны с осцилляциями в противофазе и амплитудами колебаний высот поверхности до 0,7 м

Fig. 2. Fluctuation of surface above Lake Vostok along track 330. The coordinates of transition zones are 22 and 125 km. Oscillations in transition zones out of phase in the range 0.7 m are clearly seen

екции орбиты соответствует пространственной частоте 170 м. Точность измерения высот зависит от локальных уклонов поверхности. Для гладкой поверхности над оз. Восток с уклонами до 1' (угловая минута) среднеквадратическая ошибка измерений высот в отдельных 50-метровых элементах пространственного разрешения составляет 3 см. Цикл измерений определяется интервалом между повторным прохождением орбиты и составляет 91 день. Космическая система ICESat прекратила измерения в конце 2009 г., выполнив повторные измерения высот в течение 15 кампаний. Положение проекций орбит (треков) над оз. Восток показано на рис. 1 на восходящих и нисходящих витках.

При интерполяции измерений между треками для вычисления высот по регулярной сетке

можно получить равномерную сеть высот точек, однако здесь следует проявлять осторожность, так как расстояния между соседними треками равны 12–20 км и интерполяция неизбежно приведёт к потере точности. Оценку флуктуаций поверхности над озером целесообразно начать с анализа изменений высот вдоль треков, где число измерений достигает 2000. Флуктуация поверхности вдоль трека 330 показана на рис. 2. Там же представлено положение вертикального профиля. Изменения профиля выражаются не только в общем подъёме или опускании, но и одновременно в локальной деформации поверхности. Низкочастотная флуктуация приводит к поднятию или опусканию всей поверхности. Наибольшие колебания происходят в переходных зонах на линии налегания. Высокочастотные осцилляции, возникающие главным образом из-за метелевого переноса снега и приводящие к его перераспределению, характеризуются локальным изменением высот по всей поверхности озера. Амплитуды флуктуаций определены в период с февраля 2004 по ноябрь 2008 г. вдоль проекций орбит ICESat в течение 15 кампаний по 60 тыс. точек в каждой кампании со среднеквадратической ошибкой измерений 3–4 см. За короткий 4-летний период поверхность осциллирует относительно средней высоты. Однако поведение поверхности можно ассоциировать с признаками прерываемого равновесия, присущего явлению самоорганизованной критичности, весьма распространённому в различных природных процессах.

Совокупность локальных флуктуаций, пространственные размеры которых распределены в интервале 50–10000 м, представляет собой фрактальную динамическую структуру. Подобная динамическая структура сочетания дефляции и надува характеризуется степенным распределением динамических форм, возникающих на поверхности озера:

$$N(a) \propto a^{-D},$$

где a — площадь; $N(a)$ — число элементов структуры с размером a ; $D = 1,80$ — фрактальная размерность.

Изменение высоты поверхности вдоль вертикального профиля может быть представлено в виде $\Delta h = \langle A_{i,t+1} - A_{i,t} \rangle$ как среднее разности высот всех точек i профиля для последовательных измерений во время $t, t+1$. Объединение измерений по всем проходящим по поверхности озера трекам позволяет охарактеризовать флуктуацию поверхности над озером (см. рис. 2).

Измерения высот привели к новому представлению о форме поверхности над озером. Эта поверхность — не наклонная плоскость, качест-

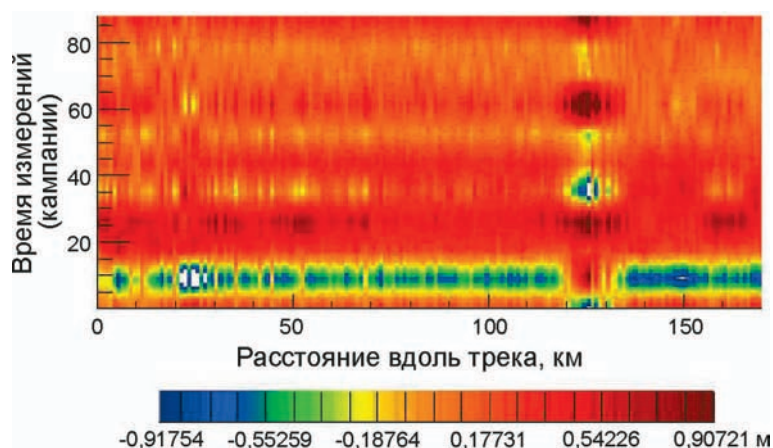


Рис. 3. Спектрограмма флуктуаций высот над оз. Восток вдоль трека 330 в период 13 кампаний с апреля 2004 г. по февраль 2008 г.

Ось абсцисс аналогична горизонтальной оси координат на рис. 2. Ось ординат соответствует времени измерений (кампаниям). Для большей наглядности шкала времени увеличена в 10 раз за счёт интерполяции измерений между кампаниями. Выделяются переходные зоны с осцилляциями в противофазе и амплитудами колебаний высот поверхности в интервале $-0,7 \div 0,7$ м

Fig. 3. Spectrogram of elevation change above Lake Vostok along track 330 for the period of 13 campaigns from April 2004 to February 2008.

The abscissa axis is analogous to the horizontal axis in Fig. 2. The ordinate axis corresponds to time of measurements (campaigns). For better visual representation, the time scale is magnified tenfold due to interpolation of measurements between the campaigns. The transition zones with out of phase oscillation and amplitudes of elevation change are in interval $-0,7 \div 0,7$ m

венно её можно определить как каустическую поверхность. Она имеет множество перегибов как вдоль меридиональных, так и вдоль широтных направлений с перепадом высот около 40 м, а также локальные впадины. Уклоны поверхности вдоль склона поперёк озера могут быть отрицательными, достигая $0,5'$. Направления склонов имеют чётко выраженное бимодальное распределение, которое показывает, что главные направления (азимуты) склонов отличаются на 140° . Флуктуации высот вдоль и поперёк поверхности над озером резко отличаются. Профили вертикальных сечений вдоль озера характеризуются поднятием и опусканием без деформации самого профиля, а колебания всех точек профиля происходят в одной фазе. Флуктуация профилей вертикального сечения поперёк озера сопровождается его деформацией. Это означает, что отдельные участки поверхности колеблются в противоположных фазах, т.е. отдельные части профиля имеют разные направления перемещения (поднятия и опускания). Наиболее контрастная разность фаз флуктуаций наблюдается над озером и за его пределами.

Используя результаты детальных измерений высот, мы определили проекцию береговой линии на ледниковую поверхность над озером и объяснили геометрическую связь положения береговой линии с перегибами на поверхности. Следует иметь в виду, что за счёт гидростати-

ческого равновесия высоты точек береговой линии имеют разные значения, отличающиеся более чем на 500 м. Согласно термодинамической модели растекания льда над подледниковым озером, возникают две области перехода: с ложа ледника на водную поверхность озера и с озера на ложе [2]. Этот процесс сопровождается образованием прогиба поверхности и изменением её уклона. Относительное увеличение потока льда над озером по направлению к его краю приводит к фронтальному вспучиванию, что видно на рис. 2. Обе области перехода совпадают с положением береговой линии, а последовательность формирования деформаций поверхности согласуется с термомеханической моделью. Полное представление процесса флуктуации поверхности над подледниковым озером можно получить при использовании спектрограммы (рис. 3). Флуктуация сопровождается подъёмом и опусканием поверхности, её деформацией и значительными изменениями высот в переходных зонах, которые происходят в противофазе.

Каскады подледниковых озёр и спектрограммы флуктуаций

На основе указанных дешифровочных признаков рядом с известным озером *B* в бассейне Рекавери обнаружено соседнее озеро *B1* (рис. 4). Оба озера, отчётливо опознаваемые на рис. 5, образуют каскад с перетеканием воды. Каскадное

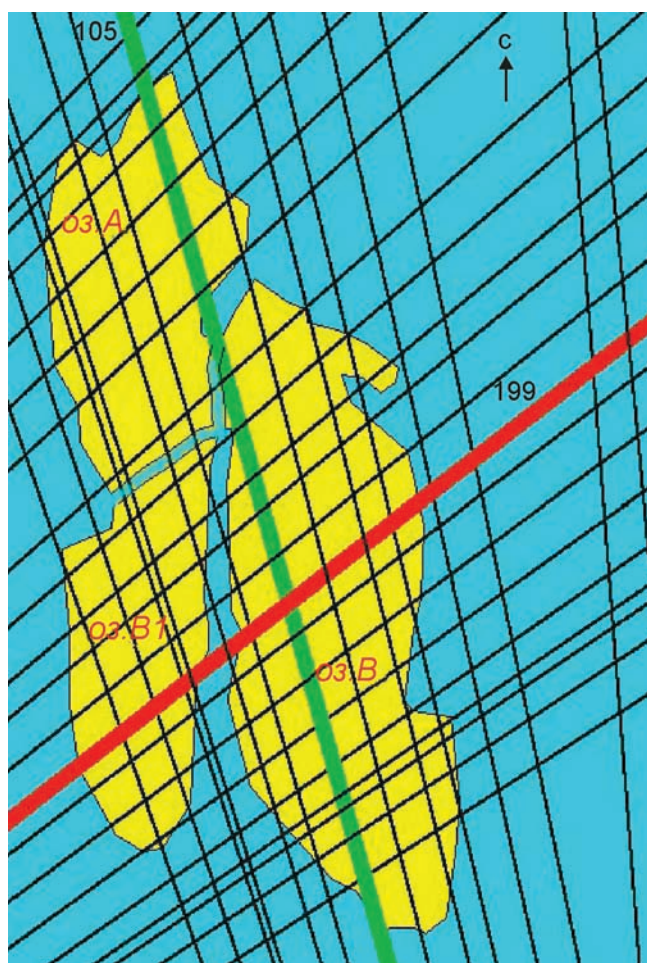


Рис. 4. Расположение и береговые линии подледниковых озёр *A*, *B*, *B1* в ледяном потоке бассейна Рекавери
Fig. 4. Location and shorelines of subglacial lakes *A*, *B*, *B1* of the Recovery ice stream catchment

поведение этих озёр проявляется в рассогласовании колебания высот их поверхностей.

Полное представление каскадного процесса и флуктуации поверхностей над смежными подледниковыми озёрами можно получить с помощью спектрограммы (рис. 6). Текущие значения высот точек вертикального профиля получены путём измерений лазерным альтиметром с космической системы ICESat в течение 13 пролётов по орбите (кампаний) вдоль трека 199. Все измерения представлены в виде горизонтальных строк. Последовательность строк вдоль оси ординат характеризует изменение высот точек профиля во времени. На спектрограмме динамика поверхностей над подледниковыми озёрами *B* и *B1* представлена в пространстве и времени. Из спектрограммы следует, что в переходных зонах колебания поверхности периодичны, а изменения высот поверхности над подледниковыми озёрами

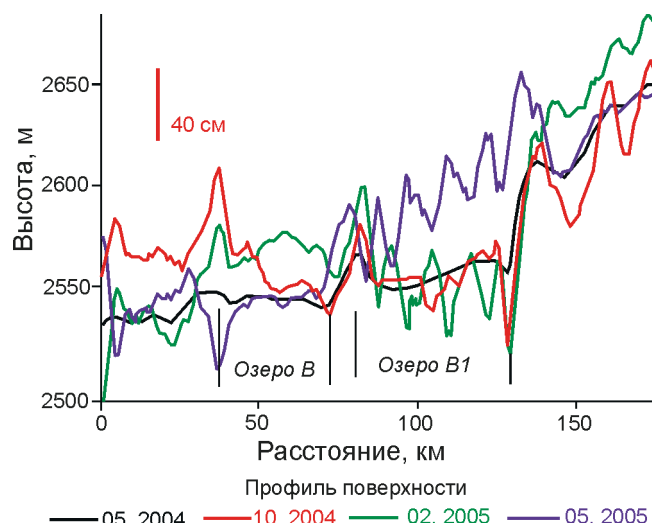


Рис. 5. Флуктуации высот поверхности над каскадом подледниковых озёр *B* и *B1* в ледяном потоке бассейна Рекавери в Восточной Антарктиде вдоль трека 199. Границы береговых линий отмечены вертикальными отрезками прямых. Выделяются переходные зоны с большими амплитудами колебаний высот в противофазе, деформации поверхности над озером *B* и разность в изменении высот поверхностей

Fig. 5. Fluctuation of ice sheet elevation above the cascade of subglacial lakes *B* and *B1* on Recovery ice stream catchment, East Antarctica along track 199. Boundary of shore lines are marked by vertical lines. Transition zones with high amplitudes of elevation changes out of phase, ice surface deformation above Lake *B*, and difference in change of ice sheet elevation are identified

носят случайный характер. В этом случае фазы изменений высот в каскаде озёр смещаются. Значимые изменения высот поверхности зафиксированы до двух раз за пять лет наблюдений.

Каскадное распределение подледниковых озёр обнаружено также вблизи купола А на склонах с уклонами порядка 8° и протяжённостью от 6 до 11 км (рис. 7). В них присутствуют и морфологические признаки формы поверхности, и динамика (в переходных зонах). По сравнению с динамикой поверхностей над подледниковыми озёрами в бассейне Рекавери для этих озёр характерен меньший разброс колебаний поверхности. Перетекание воды вдоль каскада озёр — плавное, оно не сопровождается изменением превышений между смежными озёрами, по крайней мере, в 2004–2008 гг. Колебания высот их поверхностей совершается в одной фазе (рис. 8, 9). Координаты обнаруженных подледниковых озёр в районе купола А приведены в таблице.

Другое интересное явление, обнаруженное на куполе А, связано с колебанием его высоты и целого конуса с амплитудой около 60 см (рис. 10).

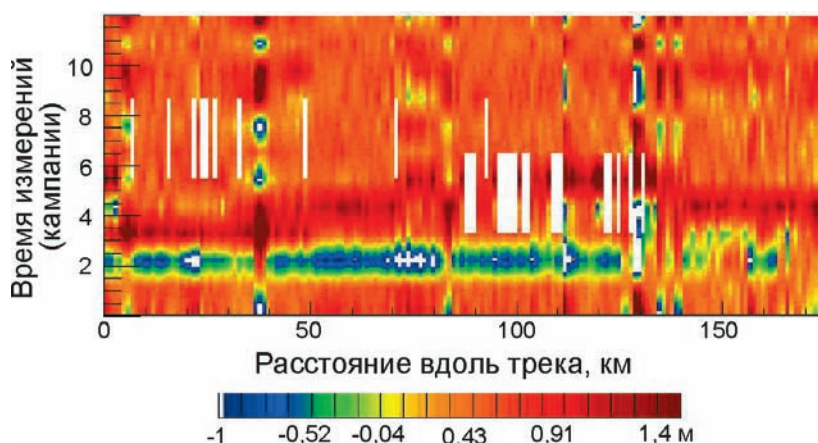


Рис. 6. Спектрограмма колебаний высот в каскаде подледниковых озёр *B* и *B1* по вертикальному профилю вдоль трека 199 в период 13 кампаний с апреля 2004 г. по февраль 2008 г. в ледяном потоке в бассейне Рекавери.

Ось абсцисс аналогична горизонтальной оси координат на рис. 5. Ось ординат соответствует времени измерений (кампаниям). В целях большей наглядности шкала времени увеличена в 10 раз за счёт интерполяции измерений между кампаниями. Координаты переходных зон 37, 73, 82 и 128 км. Выделяются крайние переходные зоны с осцилляциями в противофазе и амплитудами колебаний высот поверхности в интервале $-0,7 \div 0,7$ м. Амплитуды колебаний поверхностей над подледниковыми озёрами заметно меньше. Разность изменений высот поверхности над озёрами *B* и *B1* достигает 0,3 м и возникает только 2 раза в течение всех кампаний — в феврале и мае 2005 г.

Fig. 6. Spectrogram of elevation change on the cascade of subglacial lakes *B* and *B1* on Recovery ice stream catchment based on the vertical profile along track 199 for the period of 13 campaigns from April 2004 to February 2008.

The abscissa axis is analogous to the horizontal axis in Fig. 5. The ordinate axis corresponds to time of measurements (campaigns). For better visual representation, the time scale is magnified tenfold due to interpolation of measurements between the campaigns. The coordinates of transition zones are 37, 73, 82, and 128 km. The marginal transition zones with out of phase oscillations and the amplitudes of elevation change above lakes occur in the interval from -0.7 to 0.7 m. The amplitudes of surface oscillations above lakes are significantly lower. The difference between elevation change above lakes *B* and *B1* is up to 0.3 m, and the peak value was reached only twice during all campaigns, in February and May 2005

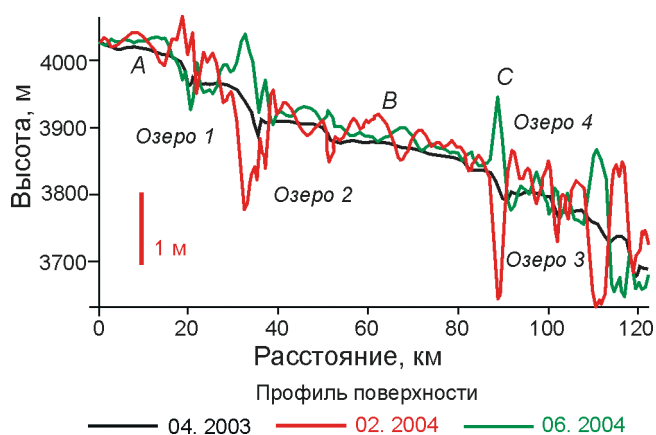


Рис. 7. Каскад подледниковых озёр в районе купола А вдоль трека 1352 и колебания высот поверхности вертикального профиля.

Наибольшие колебания возникают в переходных зонах на линии налегания. Колебания высот в переходных зонах — в противофазе. А, В, С — вертикальные профили, измеренные соответственно в феврале 2004 г., мае 2004 г. и октябре 2004 г.

Fig. 7. Cascade of subglacial lakes in the area of Dome A along track 1352 and changes of surface elevation.

The greatest oscillations occur in transition zones at the grounding lines. The values of oscillation in transition zones are out of phase. A, B and C are the vertical profiles measured in April 2003, February and June 2004 respectively

Координаты новых подледниковых озёр в Антарктиде в четырёх каскадах

Озеро	Координаты		Высота, м	Каскад/Трек
	ю.ш.	в.д.		
1	79°49'	76°30'	3964,74	1/1352
2	79°39'	76°06'	3908,23	
3	79°94'	75°09'	3805,42	
4	79°26'	79°43'	3900,67	2/1298
5	79°21'	79°53'	3869,80	
6	79°14'	76°44'	3826,17	3/236
7	79°3'	76°22'	3751,20	
8	78°55'	76°4'	3696,06	
9	78°9'	71°39'	3248,80	4/251
10	77°57'	71°18'	3174,75	

Синхронность колебаний поверхностей над подледниковыми озёрами и окружающим их пространством на куполе А может прерываться, вызывая относительное изменение высот до 40 см.

Незатухающие колебания высоты в переходных зонах представляют собой периодический

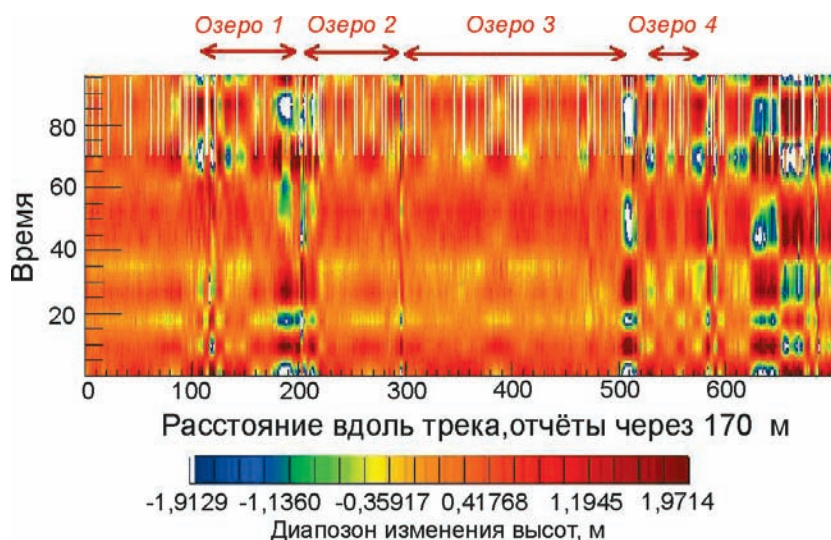


Рис. 8. Спектрограмма колебаний высот в районе купола А вдоль трека 1352, соответствующего рис. 7, но дающая представление о поведении каскадов озёр в течение пяти лет (2003–2008).

На спектрограмме отображена динамика поверхности в переходных зонах и деформация самой поверхности

Fig. 8. Spectrogram of elevation change along track 1352 on Dome A, corresponding Fig. 7, but represents pattern of surface elevation behaviour on the cascade of lakes during five years (2004–2008).

Surface dynamic and fluctuation in transition zones are clearly to be seen

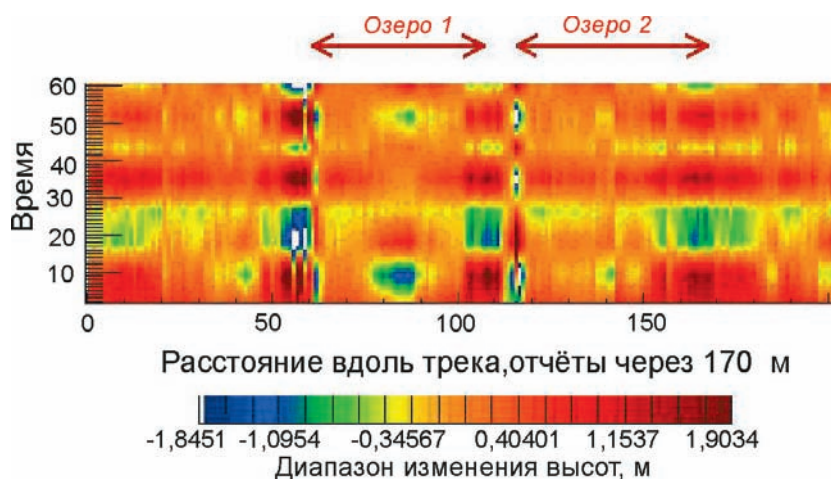


Рис. 9. Спектрограмма колебаний высот вертикального профиля каскада подледниковых озёр вдоль трека 1298 в районе купола А (2004–2008).

Fig. 9. Spectrogram of surface elevation change along in vertical profile along track 1298 on Dome A (2004–2008)

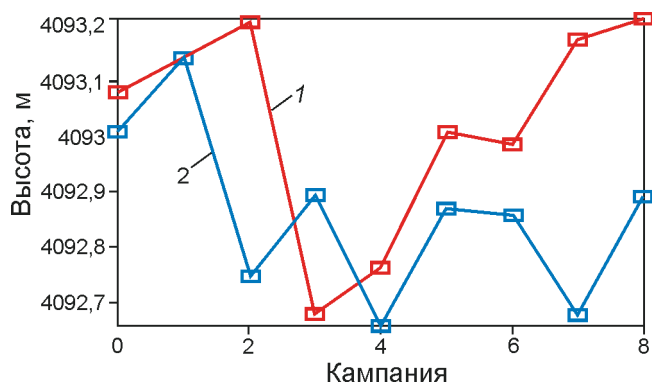


Рис. 10. Сравнение колебаний высот поверхностей купола А и над подледниковым озёром вдоль трека 1298 с 2004 по 2008 г.

1 – купол А; 2 – над подледниковым озёром; высота над подледниковым озёром увеличена на 190 м для наглядности сопоставления двух процессов

Fig. 10. Oscillations of the surface on Dome A (1) and above the subglacial lake (2) from 2004 to 2008.

Elevation above the subglacial lake is increased by 190 m for better visual comparison

процесс. Точно определить его период невозможно из-за дискретности измерений (кампаний) ICESat и неравномерности интервалов. Он составляет от 3 до 5 месяцев. Период процесса колебаний высот в переходных зонах – 3 месяца. Однако есть основания предполагать, что он может быть меньше: пропорционально долям от 3 месяцев. Причина высокочастотных флуктуаций в переходных зонах и период колебаний высот поверхности в них зависят от влияния неравномерной скорости движения ледника поперёк линии налегания. Это приводит к относительно-му увеличению частоты колебаний в переходных зонах, заметной периодичности и увеличению амплитуды колебаний, наблюдаемой над всеми подледниковыми озёрами в Антарктиде. Средне-квадратическое отклонение высот точек в переходных зонах составляет 100 см в отличие от 10 см над подледниковыми озёрами. Сравнение динамики каскадов подледниковых озёр в бассейне

Рекавери с районом вблизи купола А показывает, что колебания высот поверхностей каскадов озёр на куполе А происходят в одной фазе. В бассейне Рекавери наблюдаются рассогласование изменения высот и спонтанное смещение фаз.

Закключение

Рассмотренные морфологические и динамические признаки индицируют подледниковые озёра и положение их береговой линии. Из этого следует, что форма поверхностей и их поведение над каскадами подледниковых озёр и их переходными зонами подобны. С технологической точки зрения работа обосновывает методику картографирования подледниковых озёр Антарктиды по лазерным космическим измерениям высот поверхности.

Работа выполнена по программам фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 и ОНЗ РАН № 11, гранту РФФИ № 12-05-00107а и подпрограмме «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан». Материалы измерений ICESat были любезно предоставлены National Snow and Ice Data Center, США.

Литература

1. Зотиков И.А. Антарктическое подледниковое озеро Восток. М.: Научный мир, 2010. 147 с.
2. Котляков В.М., Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Москалевский М.Ю., Тюфлин А.С. Прерываемое равновесие подледникового озера Восток в Антарктиде // ДАН. 2011. Т. 438. № 1. С. 118–120.
3. Котляков В.М., Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Москалевский М.Ю., Тюфлин А.С. Каскады подледниковых озёр в Антарктиде // ДАН. 2012. Т. 443. № 5. С. 620–623.
4. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 13–24.
5. Bell R.E., Studinger M., Shuman C.A., Fahestock M., Joughin I. Large subglacial lakes in East Antarctica at the onset of fast-flowing ice streams // Nature. 2007. V. 445. P. 904–907. doi:10.1038/nature05554.
6. Fricker H.A., Scambos T., Bindshadler R., Pakman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // Science. 2007. V. 315. P. 1544–1548.
7. Pattyn F. A new three-dimensional higher-order thermomechanical ice sheet model: Basic sensitivity, ice stream development, and ice flow across subglacial lakes // Journ. of Geophys. Research. 2003. V. 108. 15 p. B8. 2382. doi:10.1029/2002JB002329.
8. Smith B.E., Fricker H.A., Joughin I.R., Tulaczyk S. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008) // Journ. of Glaciology. 2009. V. 55. № 192. P. 573–595.
9. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. V. 440 (7087). P. 1033–1036.

Summary

Progress in understanding cascades of subglacial lakes in Antarctica and surface dynamics was derived using satellite laser altimetry measurements ICESat. The morphological and dynamical pattern troughs and swells indicate subglacial lakes and positions of their shorelines. Oscillations of surfaces in transition zones are periodic, while the changes in surface elevation above subglacial lakes are random. Elevation change in cascade occurs out of phase. The standard deviation for elevation for transition zones is 100 cm, in contrast to 10 cm above the subglacial lakes. Complete insight into the cascade process and fluctuations of surface above the adjacent lakes in space and time has been derived using spectrogram. The pattern of surface displacements above cascades of subglacial lakes in Antarctica and their transition zones are similar. In the sense of technology, the paper initiates the method of mapping subglacial lakes based on satellite laser measurements of elevation.