

УДК 551.324.54

Определение профилей высот поверхности ледника вдоль внутриконтинентальных трасс в Антарктиде посредством кинематических GPS-наблюдений

© 2012 г. Д.В. Федоров¹, L. Schröder², А. В. Егоров¹, С. Knöfel², Е.В. Бровков¹,
А. Richter², В.В. Лукин³, R. Dietrich²

¹ОАО «Аэрогеодезия», Санкт-Петербург; ²Технический университет Дрездена, Германия;

³Российская антарктическая экспедиция, Санкт-Петербург

ffddv1982@yandex.ru

Статья принята к печати 3 октября 2012 г.

Альтиметрия, Антарктида, кинематика GPS, континентальная трасса, профиль высот, цифровая модель высот DEM. Altimetry, Antarctica, continental traverse, DEM, GPS kinematic, height profile.

С помощью кинематических GPS-наблюдений получены профили высот поверхности Антарктического ледникового щита на внутриконтинентальных трассах с точностью 20 см. Спектральный анализ позволяет выделить зоны с различными свойствами рельефа. Полученные профили высот поверхности сравниваются с данными лазерной альтиметрии спутника ICESat и четырьмя цифровыми моделями высот DEM. Установлено, что данные альтиметрии и наблюдения *in-situ* согласуются в пределах 30 см. Соответствие современных цифровых моделей высот данным GPS-наблюдений для верхней части ледникового купола находится в пределах нескольких метров.

Введение

Точные сведения о поверхностной геометрии Антарктического ледникового щита — фундаментальная основа для гляциологических и многих других исследований. Цифровые модели высот (Digital Elevation Model, DEM) дневной поверхности необходимы для гляциодинамического моделирования скорости и направления течения ледника. Важны они и для интерпретации материалов дистанционного зондирования, например, определения полей скоростей наблюдаемых пунктов на основе данных спутниковой радарной интерферометрии. Современная топография ледовой поверхности служит также основой для реконструкции ледниковой эволюции Антарктиды и оценок прошлых и будущих изменений ледниковой массы. Повторные высокоточные определения высоты поверхности ледника позволяют оценить баланс массы льда, что вызывает особый интерес в условиях изменения климата.

К классическим методам определения высот поверхности ледникового щита относится геометрическое и тригонометрическое нивелирование [10]. Однако использование этих наземных методов эффективно только на небольших расстояниях, которые не сопоставимы с размерами континентального ледникового щита. Спутниковая альтиметрия даёт возможность получить DEM континентальных масштабов. Существуют два основных метода спутниковой альтиметрии: радарный и лазерный. Радарно-альтиметрические данные спутника ERS-1 [7] имели большое значение для создания континентальных DEM ледниковой поверхности Антарктиды с высоким пространственным разрешени-

ем [13]. С помощью лазерного альтиметра спутника ICESat [15] были получены данные о высотах ледниковой поверхности нового качества. И хотя они имеют меньшее пространственное разрешение, полученные значения высот определены значительно точнее, чем по данным радара. Это связано с тем, что при используемой в лазерном излучении длине волны (в отличие от радарного) отсутствует эффект проникновения излучения в верхний слой ледника. Применять другие технологии для создания DEM и SAR-интерферометрии (например, Tandem X, [4]) внутри Антарктического ледникового щита довольно сложно ввиду отсутствия стабильных ландшафтных структур, которые могли бы служить опорными точками.

Сегодня у нас есть несколько различных DEM Антарктического ледникового щита, полученных, в основном, с помощью спутниковой альтиметрии. Все эти модели имеют разную точность. Вдоль треков спутников точность всегда выше, чем внутри ячеек сети, образованной проекциями спутниковых орбит на земной поверхности. Точность DEM зависит от локального уклона поверхности и географической широты, поэтому довольно трудно надёжно оценить точность отдельно взятой DEM в определённом районе исследований. Внутри ячеек, где высоты поверхности получены интерполяцией, желательнее проверять эти модели независимыми наблюдениями. В настоящей работе для определения профилей высот поверхности используются кинематические GPS-наблюдения вдоль континентальных трасс между станциями Восток, Мирный и Прогресс (рис. 1). Основываясь на статистическом анализе, мы сделали оценку погрешностей профилей, а

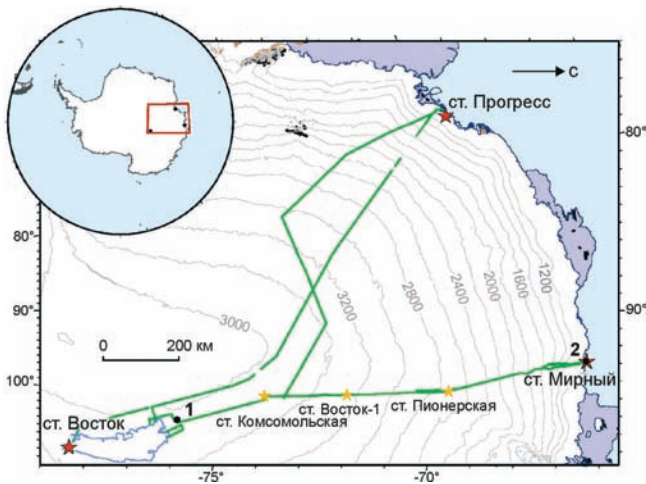


Рис. 1. Карта района исследований.

Зелёные линии показывают траектории кинематических профилей. Звёздочками показаны действующие (Прогресс, Мирный, Восток) и законсервированные (Пионерская, Комсомольская, Восток-1) российские антарктические станции. Высотные контуры построены по цифровой модели высот [3] и проведены с сечением 200 м. Для береговой топографической основы взяты данные Antarctic Digital Database v5.0. Береговая линия оз. Восток, показанная голубым контуром, построена по данным [2]. На врезке в левом верхнем углу показан район исследований в Антарктиде; 1–2 – точки профиля, см. текст

Fig. 1. Map of the work area.

Green lines show the trajectory of the height profiles determined along the scientific traverses. The Russian Antarctic stations Progress, Vostok and Mirny, and the former stations Komsomolskaya, Vostok-1 and Pionerskaya are shown as stars. Height contours are from the DEM of [3], contour interval 200 m; the coastal topography is from the Antarctic Digital Database (cite); the shoreline of subglacial Lake Vostok (light blue) is from [2]. The inset shows the location of the sector Progress – Vostok – Mirny in East Antarctica; 1–2 – dots of the profile, see text

также определили геометрические параметры рельефа поверхности. В результате сравнения полученных высот поверхности с альтиметрическими данными ICESat и четырьмя моделями DEM сделаны выводы о точности результатов альтиметрии и DEM.

Геодезические наблюдения

В период 52–56-й Российских антарктических экспедиций (РАЭ, 2006–2011 гг.) были выполнены полевые геодезические работы на протяжённых внутриконтинентальных маршрутах, связывающих станцию Восток со станциями Мирный и Прогресс. В каждую РАЭ выполняется логистический санно-гусеничный поход (СГП) по обеспечению топливом и продовольствием станции Восток. До 2009 г. СГП начинались со станции Мирный. С 2009 г. роль логистического центра по формированию СГП для станции Восток стала выполнять станция Прогресс. Часть геодезических полевых измерений была проведена по пути следования СГП. Для выполнения научных задач, параллельно с логистическими, были отдельные дополнительные походы по специальным маршрутам. Участие в СГП дало уникальную возможность доступа к удалённым

внутренним территориям континента и проведения там геодезических наблюдений *in-situ*.

Для кинематических измерений геодезические GPS-антенны и приёмники устанавливались на походные машины, во время движения которых велась непрерывная запись GPS-данных. Качество получаемых записей зависело от типа походных машин, каждая из которых имела свои особенности. Так, старые тягачи АТТ представляли собой тяжёлые и высокие машины, для которых было характерно довольно сильное динамическое раскачивание GPS-антенны из-за периодического неравномерного погружения гусениц в рыхлый снег, приводившего к заваливанию машины и, как следствие, к сильным наклонам плоскости антенны относительно горизонта. Естественно, это влияло на качество кинематических наблюдений. Снего-болотоходы ДТ-30 «Ишимбай» лучше подходили для кинематических наблюдений. Это – также тяжёлая машина, но большей длины, поэтому она менее подвержена погружению в рыхлый снег. Кроме того, низкое относительно снежной поверхности расположение кабины позволяло устанавливать GPS-антенну на меньшую высоту, что снижало влияние динамического раскачивания. Однако самым подходящим вариантом были современные тягачи «Kässbohrer» вследствие их небольшой массы, низкого профиля и скоростных характеристик.

Для кинематических наблюдений использовались двухчастотные GPS-приёмники. GPS-антенны крепились на крышах машин таким образом, чтобы обеспечить стабильность их положения в течение всего похода. С целью высокого пространственного разрешения данных частота записи составляла от 1 до 15 секунд. Записанные данные GPS-наблюдений содержали двухчастотные кодовые и фазовые измерения. Инструментальная высота антенны (высота, измеренная от поверхности снега до фазового центра GPS-антенны) измерялась и документировалась, по крайней мере, один раз в день. Глубина погружения машины в снег изменялась в зависимости от его плотности на протяжении маршрута. В результате изменялась и высота антенны над поверхностью снега.

Для определения положения кинематических профилей с высокой точностью (в пределах нескольких сантиметров) требовалось производство GPS-наблюдений роверными (передвижными) приёмниками совместно с базовыми (стационарными), расположенными в прибрежной зоне на опорных пунктах, для создания общих временных интервалов наблюдений. Поэтому в процессе всего кинематического профилирования на российских антарктических станциях Мирный, Прогресс и Восток устанавливались полуавтоматические GPS-станции. На базовых пунктах использовались типы приёмников, идентичные по характеристикам кинематическим приборам. Запись данных на базовых и роверных приёмниках велась с одинаковой дискретностью. Бесперебойное электропитание приёмников на протяжении всех измерений обеспечивали солнечные батареи.

Таблица 1. Характеристика выполненных кинематических съёмов по внутриконтинентальным профилям

| Профиль | Маршрут | Общая протяжённость, км | Начало/конец наблюдений | Тип машины* | Интервал регистрации, с | Базовая GPS-станция** |
|---------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------|
| K52A | Восток – Мирный | 2280 | 07.01.2007/05.03.2007 | И | 1 | MIRN |
| K52C | Оз. Восток – Мирный | 1260 | 04.02.2007/05.03.2007 | А | 1 | |
| K53A | Восток – Пионерская | 1745 | 11.01.2008/18.02.2008 | И | 1 | PROA, VOST |
| K53B | Пионерская – Мирный | 400 | 19.02.2008/13.03.2008 | А | 1 | |
| K53D | Восток – Мирный | 1955 | 09.01.2008/14.03.2008 | | 1 | |
| K55A | Восток – Прогресс | 1690 | 24.01.2010/19.03.2010 | | 15 | |
| K55B | Оз. Восток – Прогресс | 1460 | 31.01.2010/15.03.2010 | | 15 | |
| K56A | Прогресс – Восток – КМ250 | 2720 | 07.01.2011/08.02.2011 | К | 15 | |
| K56C | КМ100 – Прогресс | 77 | 13.02.2011/14.02.2011 | | 1 | PROA |

*А – АТТ; И – Ишимбай; К – Kässbohrer. **Базовая GPS-станция: MIRN – станция Мирный; PROA – станция Прогресс; VOST – станция Восток.

Данные наблюдений накапливались и хранились при помощи дата-логгеров. В табл. 1 приведена информация по всем выполненным кинематическим съёмкам.

Обработка данных и результаты

Данные GPS-наблюдений с роверных и базовых станций были совместно обработаны в дифференциальном кинематическом режиме. Для этого использовался научный программный пакет Bernese GPS Software 5.0 [5]. При обработке применялись современные модели ряда эффектов, влияющих на точность: атмосферная задержка сигнала; вариации фазовых центров антенн; приливные и нагрузочные эффекты.

Прежде всего определяли координаты и скорости GPS-пунктов, использованных в качестве базовых. Эти координаты и скорости относятся к новой глобальной координатной отсчётной основе, базирующейся на GNSS-наблюдениях (Global Navigation Satellite Systems) [1]. Данная основа представлена на Земле 350 постоянно действующими GNSS-пунктами с установленной на них аппаратурой для непрерывных наблюдений. Постоянно действующий GPS-пункт на станции Восток, работающий с 2008 г., отличается от прочих пунктов, так как его антенна установлена на поверхности ледника и он перемещается с большей скоростью (приблизительно 2 м/год; [14]) по сравнению с пунктами, закреплёнными в скальных выходах (менее 1 см/год; [1]). Тем не менее, непрерывные GPS-данные, накопленные на станции Восток за 4-летний период работы, подтвердили линейность движения пункта во времени, что позволило использовать его в качестве полноценного опорного пункта.

Затем для каждой кинематической эпохи наблюдений (эпоха – это GPS-термин – момент времени, определённый дискретностью записи, в который приёмник записывает информацию о спутниковом созвездии) устанавливали мгновенные разности координат между GPS-антенной движущейся машины и базовыми пунктами. Таким образом были получены наборы 3D-координат роверной антенны на каждую эпоху наблюдений. Вре-

менные ряды этих координат описывают траекторию роверной антенны в глобальной отсчётной основе. Для снижения влияния стохастических ошибок на координаты антенны по каждой эпохе ряды координат сглаживались низкочастотным фильтрованием путём определения среднего значения в пространственной области шириной 100 м, скользящей вдоль профиля от начальной точки к конечной. После этого мгновенная инструментальная высота антенны вычиталась из мгновенных вертикальных компонент координат GPS-антенны на каждую эпоху наблюдений. Мгновенную инструментальную высоту антенны получали путём интерполяции измерений на отрезках пути между местами стоянок, на которых они проводились. Как уже отмечалось, установленная на крыше машины GPS-антенна подвергалась продольному и поперечному динамическому раскачиванию, поэтому инструментальные высоты антенны в покое и во время движения отличались. Это учитывалось с помощью модели динамической коррекции для каждого измерения высоты антенны ещё до интерполяции. Для каждой эпохи наблюдений мгновенная инструментальная высота антенны определялась путём усреднения ближайших скорректированных значений высот на стоянках, которые затем распределялись по весам в обратной зависимости от расстояний между мгновенными положениями машины и местами измерений.

В результате были получены профили высот поверхности ледника вдоль трасс походов в глобальной координатной отсчётной основе. На рис. 2 в качестве примера показан полученный высотный профиль между подледниковым озером Восток (точка 1 на рис. 1) и станцией Мирный (точка 2 на рис. 1). Вокруг станции Восток и вдоль трассы Восток – Комсомольская антропогенное влияние привело к искусственному образованию отдельных форм микрорельефа с аномальными уклонами на небольших отрезках. Разрешение альтиметрических данных и DEM не позволяет их регистрировать, поэтому все профили высот вблизи станции Восток, вдоль трассы СГП Восток – Комсомольская и на подледниковом озере Восток были исключены из дальнейшего анализа.

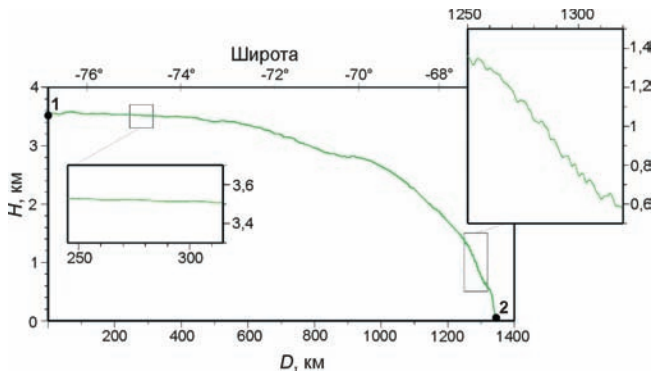


Рис. 2. Профиль высот, полученный на основе кинематических GPS-наблюдений вдоль трассы Восток – Мирный. Высота поверхности ледника над эллипсоидом WGS84 H показана как функция расстояния D между точками 1 и 2 вдоль трассы (см. рис. 1). На двух вставках показаны масштабированные участки профиля высот с различными свойствами рельефа поверхности
Fig. 2. Height profile derived from kinematic GPS observations along the traverse Vostok–Mirny. Over the distance D along the traverse track between points 1 and 2 (shown in Fig. 1) the height H of the snow surface relative to the WGS84 ellipsoid is shown. The two insets are a zoom into two segments of the height profile with different surface relief properties

Точность полученных высотных профилей зависит от двух факторов: погрешностей определения координат GPS-антенны и погрешностей определе-

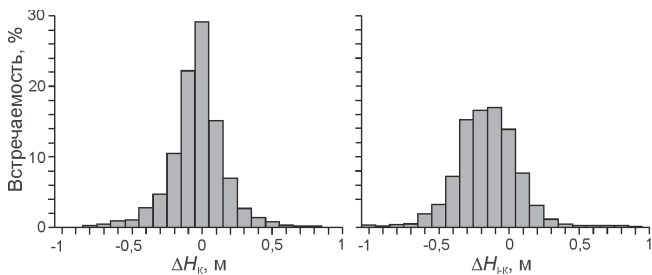


Рис. 3. Гистограммы.
Слева: разностей пересечений профилей высот, полученных из кинематических GPS-наблюдений. На 4739 точках пересечения получены разности ΔH_K между вторым и первым измерением и показано их статистическое распределение.
Справа: разностей пересечений между высотными профилями, полученными из кинематических GPS-наблюдений, и высотами поверхности, полученными из данных лазерной альтиметрии ICESat. На 5721 точках пересечений GPS-профилей с треками ICESat получены разности высот ΔH_{I-K} (ICESat минус GPS) и показано статистическое распределение. Отдельные выбросы значений (1% общего числа пересечений) не показаны
Fig. 3. Histograms.
Left: of crossover differences of the height profiles derived from kinematic GPS observations. At 4739 intersection points of the height profiles the height differences ΔH_K of the second measurement minus the first measurement were determined and their frequency distribution is shown.
Right: Histogram of crossover differences between the height profiles derived from kinematic GPS observations and surface heights derived from ICESat laser altimetry. At 5721 intersection points of the height profiles with the ICESat satellite tracks the height difference ΔH_{I-K} of the surface height derived from ICESat minus the GNSS derived height were determined and their frequency distribution is shown. Gross outliers (1% of the total number of crossovers) are not shown

ния мгновенной инструментальной высоты GPS-антенны. Анализ пересечений GPS-треков позволяет объективно найти общую погрешность в определении профиля высот поверхности. На каждом пересечении двух профилей высота обоих треков интерполируется в точке пересечения. Разности между двумя интерполированными высотами (поздняя минус ранняя) интерпретируются как показатель погрешности профиля высот. Разности высот на пересечениях складываются из погрешностей GPS-позиционирования и ошибки измерения инструментальной высоты антенны, а также из реального изменения высоты поверхности ледника в промежутке времени между кинематическими съёмками. Таким образом, полученные из разброса значений разностей пересечений достоверительные интервалы оценены как слишком пессимистичные (большие) для обеспечения необходимой точности.

Всего в районе работ проанализировано 4880 пересечений GPS-треков. 141 очевидный выброс (< 3%) был исключён. Оставшиеся 4739 разностей пересечений показывают среднее значение $-2,8$ см и стандартное отклонение 19,8 см. Статистическое распределение разностей пересечений, иллюстрированное на рис. 3 (слева), соответствует нормальному распределению. Небольшое, статистически несущественное среднее значение показывает, что разности пересечений не затронуты систематическим общим изменением высоты поверхности ледника за то время, когда велись кинематические съёмки. Следовательно, точность отдельно взятого значения высоты кинематического GPS-профиля находится в пределах 20 см.

Анализ профилей высот

Спектральный анализ профиля рельефа поверхности.

Два масштабированных участка высотного профиля на рис. 2 показывают очевидную разницу между рельефами Антарктического купола и береговой зоны. На более низких относительно уровня моря северных участках характер рельефа поверхности намного более энергичный в дополнение к более сильному общему градиенту. Спектральный анализ применялся для количественного описания разницы рельефа поверхности и его изменения вдоль профиля 1 – 2 (см. рис. 1). Сначала значения высот профиля K52A, которые нерегулярно распределялись в пространстве из-за непостоянной скорости машины, были повторно выбраны по равным интервалам (каждые 100 м). Затем крупномасштабный тренд был удалён из высот с помощью полинома 10-го порядка. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) выполнено на редуцированных вариациях высот поверхности вдоль двух 410-километровых участков профиля. Первый участок соответствует первым 410 км от точки 1 по направлению на север, второй участок находится между 820 км и точкой 2. Спектры амплитуд, полученные из БПФ двух участков, показаны на рис. 4 (1, 2).

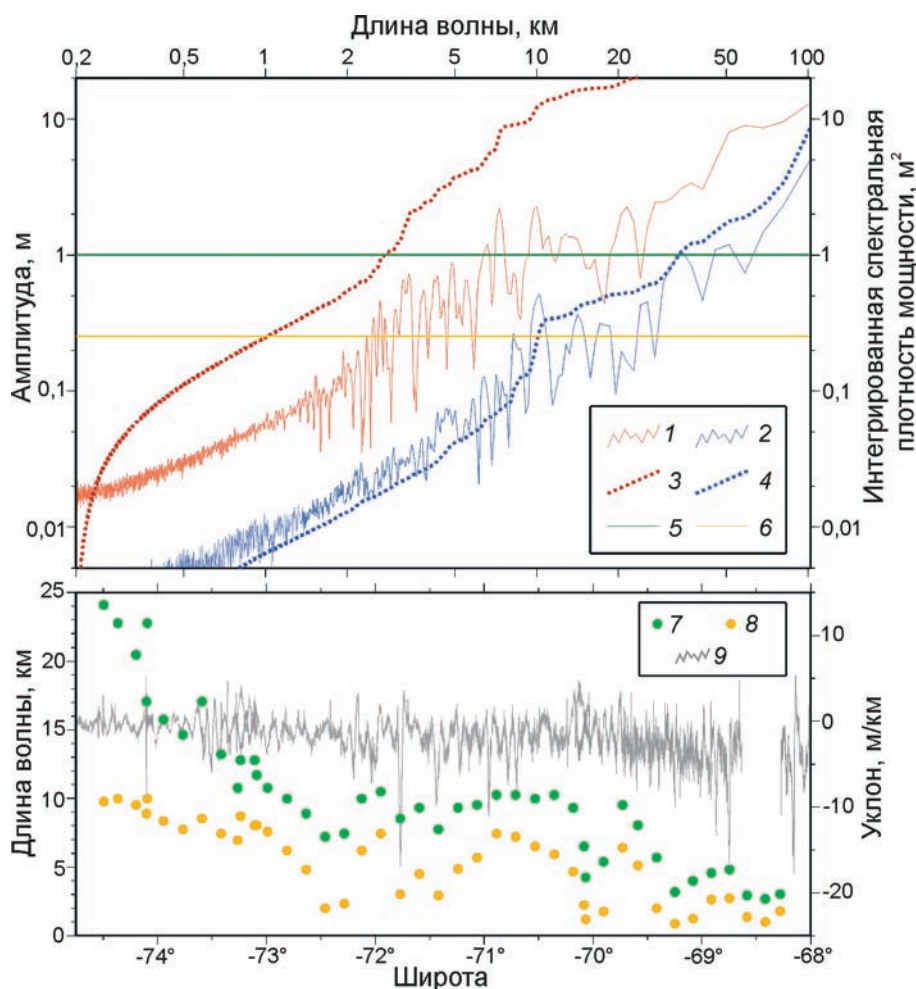


Рис. 4. Спектральный анализ рельефа.

Вверху: Спектральное представление рельефа поверхности. Тренд высот поверхности вдоль профиля 1–2 (см. рис. 1, 2) был удалён с применением полинома 10-го порядка. Спектры амплитуд вычислены из остаточных высот самого северного (1) и самого южного (2) 410-километровых участков профиля и показаны как функция длины волны. Из спектра амплитуд была выведена интегрированная СПМ для северного (3) и южного (4) участков. Интегрированный уровень СПМ 1 м^2 (5) и $0,25 \text{ м}^2$ (6) также включён. Точки пересечения кривых интегрированной СПМ с этими линиями означают расстояния, на которых достигнуты изменения высоты 1 м (5) и $0,5 \text{ м}$ (6).

Внизу: Вариации характерных длин волн по географической широте, на которых происходят изменения высот 1 м (7) и $0,5 \text{ м}$ (8). Включены вариации уклона поверхности по широте (9), полученные из профиля высоты поверхности 1–2

Fig. 4. Spectral analysis of relief.

Top: Spectral representation of the surface relief. The surface heights along profile 1–2 (shown in Figs. 1, 2) were distended by a polynomial of degree 10. The amplitude spectra were computed from the residual heights of the northernmost (1) and the southernmost (2) 410 km of the profile and are shown as a function of the wavelength. From the amplitude spectra the integrated power spectra were derived for the northern (3) and southern (4) profile segment. The integrated power levels of 0.25 м^2 (5) and 1 м^2 (6) are included. The intersection points of the integrated power graphs with these lines indicate the typical distances, over which height variations of 0.5 м (5) and 1 м (6) are reached.

Bottom: Latitudinal variation of the typical wavelength over which height changes of 0.5 м (7) and 1 м (8) occur. The variation of the surface slope over latitude (9) as derived from the surface height profile 1–2 is included

В обоих случаях, как ожидалось, установлено увеличение амплитуд рельефа с ростом длины волны. По всему спектру для северного участка получены бóльшие амплитуды, чем для южного. Спектральная плотность мощности (СПМ) была выведена из амплитуд и проинтегрирована по всему диапазону длин волн. Полученные интегрированные спектры СПМ для двух участков даны на рис. 4 (3, 4). Они показывают характерную длину волны, по которой достигнуты данная СПМ или амплитуда рельефа. Заметный относительный сдвиг

между двумя кривыми представляет собой разницу в динамике рельефа на двух участках. Горизонтальные линии показывают уровень СПМ, соответствующий вариациям высот поверхности $0,5 \text{ м}$ (5) и 1 м (6). Судя по интегрированным СПМ, превышения поверхности на 1 м ($0,5 \text{ м}$) происходят на южном участке на отрезках около 30 км (10 км), в то время как на северном участке они составляют только 3 км (1 км).

Подобный спектральный анализ был повторен в 410-километровом окне, которое перемещалось вдоль

профиля от точки 1 к точке 2 с шагом 20 км. Для каждого положения окна получена интегрированная СПМ и извлечены характерные длины волн для вариаций высоты поверхности 0,5 м и 1 м. Эти характерные длины волн показаны на рис. 4 (снизу) как функция географической широты середины окна. Полученные две точечные кривые похожи и позволяют различать три зоны. Самая верхняя зона соответствует высотам поверхности от 3300 м и южной широте от 80,0° до 72,5°. Она характеризуется уменьшением длин волн в северном направлении. В самой нижней зоне с высотами поверхности ниже 2800 м и широтами севернее 70° ю.ш. также наблюдается уменьшение длин волн. В промежуточной зоне характерные длины волн сохраняют постоянный уровень, показывая, что характер рельефа однороден по всей зоне. Идентифицированные зоны также подтверждаются изменением в локальном уклоне поверхности вдоль профиля: в южной зоне уклон сохраняется в пределах узкой полосы вблизи нулевого значения; в промежуточной зоне диапазон вариаций уклона явно увеличен; в самой низкой зоне вариации уклонов ещё больше и наблюдается ощутимая тенденция к отрицательным значениям уклонов, поскольку профиль спускается к побережью.

Сравнение результатов с данными лазерной альтиметрии ICESat. Спутник ICESat, оборудованный системой лазерных высотомеров (GLAS), позволил получить данные о высотах поверхности за 2003–2009 гг. [15]. Сбор альтиметрических данных велся 33-дневными кампаниями три раза в год. Данные, которые получены на Антарктическом ледниковом щите, представляют собой высоты ледниковой поверхности, измеренные внутри зоны диаметром 60–70 м, которые определяются диаграммой (термин, применяемый для характеристики светового пучка, который даёт пятно на поверхности в результате прохождения дистанции от точечного источника до цели (footprint)) направленности лазерного пучка (footprint). Данные репрезентативны только для этих зон, а высоты поверхности представляют собой усреднённые величины по площади зоны. Зоны расположены последовательно вдоль треков спутника с шагом 172 м. Шаг текущего трека зависит от широты и может превышать 20 км в антарктических прибрежных областях.

За основу данных альтиметрии ICESat взяты GLAS 12 data product, релиз 531 [6, 12]. Индикаторы качества и дополнительная информация, содержащиеся в наборе данных, использовались для отсева некорректных данных. Выбросы значений и данные, собранные в режиме «off-nadir», исключались. Вводились поправки за насыщенность отражённого сигнала (saturation range correction) и приливные эффекты. Данные ICESat затронуты систематическими постоянными лазера (bias) между индивидуальными операционными периодами (laser operation period biases) [9]. Относительные систематические постоянные, определённые Н. Ewert и др. [8] на подледниковом озере Восток, применены в качестве коррекций. Данные альтиметрии первоначально

данно относительно поверхности референсного эллипсоида TOPEX и в системе средних приливов (mean-tide). Для сопоставления с GPS-данными они были переотнесены к поверхности эллипсоида WGS84 в свободной от приливов (tide-free) системе.

Анализ пересечений треков выполнен для точек пересечения наземных кинематических GPS-профилей с треками ICESat в районе исследования. Проведён также анализ разностей 5721 пересечения (ICESat минус GPS). Получены среднее значение разностей и стандартное отклонение, равные соответственно –18,2 и 25,2 см. Статистическое распределение разностей пересечений показано на рис. 3 (справа). Разности пересечений включают в себя погрешности методик наблюдений – альтиметрии и GPS-позиционирования. Рассматривая погрешности высот, вычисленных на основе GPS-наблюдений ($\sigma = 19,8$ см), можно сказать, что точность отдельного ICESat значения высоты поверхности составляет 15,6 см (1σ) из стандартного отклонения разностей пересечений. Полученная средняя разность пересечений треков показывает, что высоты поверхности, вычисленные по данным ICESat, в среднем ниже GPS-профилей на 18 см. Это возможно, так как используемые относительные систематические постоянные могут вносить абсолютное смещение высот в данные альтиметрии.

Полученная средняя разность могла быть применена для коррекции относительных систематических постоянных, превращая их в абсолютные систематические постоянные лазера. Таким образом, весь набор данных альтиметров ICESat может стать совместимым с высотами GPS-профилей в районе работ. В любом случае эта абсолютная систематическая постоянная не затрагивает определение изменения высот поверхности во времени. Маловероятно, что довольно большое значение средней разности пересечений может быть связано с общим увеличением высоты поверхности в районе работ в период времени между средней операционной эпохой ICESat (раньше) и средней эпохой кинематических GPS-наблюдений (позже).

Проверка корректности DEM, основанных на спутниковой альтиметрии. Данный анализ заключался в сравнении данных о высотах поверхности DEM с высотами, полученными из GPS-наблюдений. Среди имеющихся на сегодняшний день DEM для Антарктического ледникового щита были отобраны четыре. Первая из этих DEM разработана научной группой F. Rémy и др. [13], основываясь на данных радарной альтиметрии спутника ERS-1 (модель «R»). Исследовательская группа Н. Liu и др. [11] объединила данные радарной альтиметрии ERS-1 с региональными наборами данных высот поверхности, полученными из радарных аэросъёмки, GPS-съёмки и геодезических карт (модель «L»). Для получения модели высот «D» использованы данные лазерной альтиметрии ICESat [6]. В 2009 г. J.L. Vamber и др. [3] объединили данные радарной и лазерной спутниковой альтиметрии в гибридной модели «B». Все четыре DEM дают высоту поверхности относительно

Таблица 2. Статистика валидации DEM поверхности ледника по моделям «В» [3], «R» [13], «L» [11] и «D» [5]^{1*}

| Статистические характеристики, м | Модель | | | |
|--|--|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | «В» | «R» | «L» | «D» |
| | L+R ^{2*} ; 65°–90° ^{3*} ; 1 км ^{4*} | R; 68,8°–81,8°; 2 мин | R+S; 60°–90°; 200 м | L; 63°–86°; 500 м |
| <i>Весь район исследований</i> | | | | |
| RMS | 9,05 | 32,10 | 20,52 | 45,74 |
| MEAN | –0,39 | 1,68 | 0,76 | –25,92 |
| STDEV | 9,05 | 32,05 | 20,51 | 37,69 |
| MIN | –92,81 | –44,16 | –152,88 | –340,19 |
| MAX | 126,07 | 637,28 | 110,16 | 39,54 |
| Число измерений | 213 183 | 171 625 | 213 548 | 211 830 |
| <i>Южная часть района исследований (H > 3300 м)</i> | | | | |
| RMS | 1,31 | 2,23 | 2,83 | 7,85 |
| MEAN | –0,94 | –1,04 | –1,16 | –6,17 |
| STDEV | 0,90 | 1,98 | 2,58 | 4,85 |
| MIN | –5,64 | –7,68 | –19,93 | –23,87 |
| MAX | 5,35 | 8,96 | 15,93 | 12,46 |
| Число измерений | 76 021 | 76 021 | 76 021 | 76 021 |
| <i>Средняя часть района исследований (3300 м > H > 2800 м)</i> | | | | |
| RMS | 2,39 | 4,08 | 5,74 | 13,61 |
| MEAN | –0,74 | –0,69 | –0,90 | –11,00 |
| STDEV | 2,27 | 4,03 | 5,67 | 8,01 |
| MIN | –6,79 | –10,43 | –22,21 | –35,87 |
| MAX | 22,39 | 26,31 | 30,92 | 18,64 |
| Число измерений | 49115 | 49115 | 49115 | 49115 |
| <i>Северная часть района исследований (H < 2800 м)</i> | | | | |
| RMS | 13,92 | 61,46 | 31,50 | 70,37 |
| MEAN | 0,29 | 8,63 | 3,34 | –51,69 |
| STDEV | 13,92 | 60,85 | 31,32 | 47,76 |
| MIN | –92,81 | –44,16 | –152,88 | –340,19 |
| MAX | 126,07 | 637,28 | 110,16 | 39,54 |
| Число измерений | 88 047 | 46 489 | 88 412 | 86 694 |

^{1*}Для каждой точки профиля высот поверхности вычислены разности между значением высоты (DEM минус GPS). Приведены их статистические характеристики: RMS – среднеквадратическое отклонение; MEAN – среднее значение; STDEV – стандартное отклонение; значения минимума (MIN) и максимума (MAX). Показаны результаты сравнения как для всего района исследования, так и отдельно для каждой из трёх подобластей согласно их диапазону высот. Для каждой DEM даны: ^{2*}тип данных (L – лазерная альтиметрия, ICESat; R – радарная альтиметрия, ERS-1; S – локальные съемки или аэросъемки); ^{3*}диапазон широт; ^{4*}разрешение.

эллипсоида WGS84. Основные характеристики этих четырёх моделей (площадь покрытия, номинальное решение, основной источник данных) приведены в табл. 2.

Четыре DEM были интерполированы сплайном в позициях каждой из 213 548 точек профилей высот, полученных GPS-измерениями. Определены разности зна-

чений высот DEM минус GPS. Их статистика приведена в табл. 2 как для всего региона, так и для отдельных трёх зон, различающихся по спектральному анализу профиля высот 1 – 2. Независимо от DEM наилучшее согласие с GPS-результатами получено в самой верхней зоне, а статистические параметры (стандартное отклонение) ухудшаются в направлении побережья. Это можно объяснить эффектом больших поверхностных градиентов при определении высоты поверхности средствами (особенно радарной) альтиметрии и возрастающей погрешностью применяемой интерполяции из-за усложнения рельефа по направлению к побережью. Кроме того, для всех моделей, за исключением «D», отмечается неожиданное смещение в средней разности, наблюдаемое в направлении от верхней зоны к нижней, в то время как в центральной части купола взятая из DEM высота оказывается ниже, а в периферийной зоне – выше.

Гибридная модель «В» во всех случаях показывает наилучшее соответствие GPS-результатам. Для всего региона среднее значение разности составляет –40 см при стандартном отклонении 9 м. В самой верхней зоне стандартное отклонение даже ниже 1 м, а значение разности колеблется в пределах ± 6 м. Хорошее соответствие получено также для моделей «L» и «R». Фактически как в верхней, так и в промежуточной зоне модель «R» соответствует GPS-результатам лучше модели «L». Однако общая картина ухудшается из-за больших выбросов в области крутой береговой зоны, которые характерны для радарной альтиметрии. Таким образом, модель «В» [3] может быть рекомендована для решения многих гляциологических прикладных задач. Однако для получения высоких точностей на крутых прибрежных склонах Антарктического ледникового щита кинематические *in-situ* GPS-наблюдения по-прежнему необходимы.

Заключение

Полученные профили высот поверхности Антарктического ледникового щита на внутриконтинентальных трассах имеют точность порядка 20 см. Спектральный анализ высотных профилей позволил выделить три зоны по широте и высоте, которые характеризуются специфическими свойствами рельефа. В результате анализа установлено, что в точках пересечения треков спутника ICESat и профилей GPS значения высот по данным кинематических наблюдений *in-situ* и лазерной альтиметрии хорошо согласуются между собой. Для обоих независимых методов наблюдений (ICESat и GPS) выявлена сопоставимая точность (соответственно 20 и 16 см). Средняя разница значений высот в точках пересечений треков составляет –18 см. Это может свидетельствовать, что альтиметрия ICESat даёт систематически заниженные значения высот. Данная разница может использоваться как абсолютная систематическая постоянная лазерных альтиметров.

Среди четырёх отобранных DEM модель «В» J.L. Vamber и др. [3] лучше всего соответствовала

GPS-результатам. В южной зоне ледникового щита эта модель согласуется с GPS-данными в пределах нескольких метров. Выполненный анализ показал, что использование модели «В» лучше всего подходит для решения прикладных научных задач в исследуемом регионе. Метод кинематического профилирования на основе данных GPS на сегодняшний день — наиболее точный и производительный для получения сведений о высотах поверхности ледника, поэтому последние могут приниматься за эталон. Впервые результаты профилирования, полученные на основе собранных GPS-данных, были использованы для надёжной и независимой оценки данных лазерной альтиметрии и цифровых моделей высот в данном регионе.

Представленные результаты могут служить отправной точкой для определения изменений высоты поверхности в последующие годы. Наличие большого объёма точек пересечений GPS-профилей позволяет получить точные сведения об изменениях высот для огромного по площади региона. Достоверная информация об изменениях высот поверхности может внести вклад в оценку баланса массы льда Восточной Антарктиды и в прогнозирование изменения уровня моря в настоящем и будущем. Высокое пространственное разрешение позволяет получить подробное представление о рельефе местности и плотности снежного покрова, что можно использовать для решения прикладных задач, связанных, например, с планированием и оптимизацией маршрутов санно-гусеничных походов. В будущем эффективность метода может быть дополнена сбором данных со спутников системы ГЛОНАСС, что будет способствовать повышению точности получаемых профилей высот.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам походов 52, 53, 55 и 56-й РАЭ (В.Р. Воронину, В.Е. Давыдову, М.В. Василиеву, П.П. Иванову, В.А. Цывареву, А.В. Зайцеву, А.Н. Пинягину, В.В. Олефиру, С.Ю. Зыкову, А.А. Корнееву), а также группе механиков ООО «Антраверс-Сервис», без активного участия которых было бы невозможно выполнение данной работы. А.Г. Буткевичу (Technische Universität Dresden — Institut für Planetare Geodäsie) выражается благодарность за помощь при подготовке рукописи к печати.

Полевые работы проводились при поддержке немецкого фонда научных исследований DFG (grants DI473/34-1, DI473/38-1).

Литература

1. *Матвеев А.Ю., Фёдоров Д.В., Гребнев В.П., Лукин В.В., Fritsche M., Richter A., Dietrich R.* Высоточные временные ряды координат, полученных из GNSS-наблюдений в Антарктиде I: Геодезические определения // Геодезия и картография. 2012. № 11. С. 10–20.
2. *Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.* Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 12–24.
3. *Bamber J.L., Gomez Dans J.L., Griggs J.A.* A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined

- satellite radar and laser data. Pt. I: Data and methods // The Cryosphere. 2009. V. 3. № 2. P. 101–111.
4. *Bartusch M., Hajnsek I., Janoth J., Marschner C., Miller D., Moreira A., Sparwasser N., Zink M.* TanDEM-X: The Earth in three dimensions // Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Bonn. 2009.
 5. *Bernese GPS Software Version 5.0.: User manual / Eds. R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl.* Astronomical Institute, University of Bern. 2007.
 6. *DiMarzio J., Brenner A., Schutz R., Shuman C.A., Zwally H.J.* GLAS/ICESat 500 m laser altimetry digital elevation model of Antarctica. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2007. Digital media.
 7. ESA 2012. European Space Agency - Earthnet Online. <http://earth.esa.int/ers/satconc/>
 8. *Ewert H., Popov S.V., Richter A., Schwabe J., Scheinert M., Dietrich R.* Precise analysis of ICESat altimetry data and assessment of the hydrostatic equilibrium for subglacial Lake Vostok, East Antarctica // Geophys. Journ. International. 2012, accepted.
 9. *Gunter B., Urban T., Riva R., Helsen M., Harpold R., Poole S., Nagel P., Schutz B., Tapley B.* A comparison of coincident GRACE and ICESat data over Antarctica // Journ. Geodesy. 2009. V. 83. № 11. P. 1051–1060.
 10. *Knöfel C., Hartmann J., Dietrich R., Ryvkin Yu.M., Orlov Yu.V., Matveev A.Yu., Grebnev V.P., Lukin V.V.* Changes of ice surface heights of the Hays Glacier, Enderby Land/Antarctica, over 37 years, based on repeated geodetic measurements // Proc. of the Oslo IPY Science Conference. Oslo, 2010.
 11. *Liu H., Jezek K., Li B., Zhao Z.* Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2001. Digital media.
 12. NSIDC, 2011. GLAS altimetry product usage guidance. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. http://dsidc.org/data/docs/daac/glas_altimetry_usage.html.
 13. *Rémy F., Shaeffer P., Legrésy B.* Ice flow physical processes derived from ERS-1 high-resolution map of the Antarctica and Greenland ice sheets // Geophys. Journ. International. 1999. V. 139. P. 645–656.
 14. *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 (109). P. 30–36.
 15. *Schutz B.E., Zwally H.J., Shuman C.A., Hanock D., DiMarzio J.P.* Overview of the ICESat Mission // Geophys. Research Letters. 2005. V. 32. L21S01. doi:10.1029/2005GL024009.

Summary

Surface height profiles of the Antarctic ice sheet were derived from kinematic GPS observations on continental traverses with an accuracy of 20 cm. The spectral analysis of the height profile allowed distinguishing different zones of distinct relief properties. The obtained surface height profiles were compared to ICESat satellite laser altimetry data and four different DEMs. A good agreement, within a few decimeters, is found between the in-situ observations and the altimetry data. Among the considered DEMs the model published by Bamber et al., 2009 [3] agrees best with the GPS observations. For three separate elevation zones the standard deviations of the differences of this DEM and the GPS results amount to 0.90 (above 3300 m elevation), 2.27 (2800–3300 m), and 13.92 m (below 2800 m). For the Rémy [13] and RAMPv2 [11] DEMs we obtained standard deviations of 1.98 m and 2.58 m (above 3300 m), and 4.03 m and 5.67 m (2800–3300 m), respectively.