

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПОЛЯ ГРАВИТАЦИИ ЗЕМЛИ (GRACE) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
И ОЦЕНКИ ГИДРОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КРУПНЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ<sup>1</sup>**

© 2012 г. А. А. Бульчев, Р. Г. Джамалов\*, Р. В. Сидоров

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

*119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы*

*E-mail: r.sidorov@gcras.ru*

*\*Институт водных проблем РАН*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: dzhamal@aqua.laser.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2011 г.

Приведен анализ сравнительно нового метода изучения распределения и динамики водных ресурсов суши, основанного на измерении аномалий гравитационного поля Земли с помощью спутниковой системы GRACE. Международный спутниковый эксперимент по определению гравитации и климатических изменений проводится с 2002 г. и направлен на высокочастотные (в диапазоне частот 10900–36000 Гц) измерения временных вариаций гравитационного поля Земли. Описаны метод измерений, особенность обработки данных и оценки гидролого-гидрогеологических характеристик крупных речных бассейнов и регионов по данным GRACE.

*Ключевые слова:* мониторинг, космические методы, гравитация, водные ресурсы, грунтовые воды, гидрология, покровное оледенение.

В настоящее время космические методы получают широкое использование в задачах мониторинга окружающей среды. Помимо уже известных направлений этих исследований, современные дистанционные методы дают возможность оценить запасы пресных вод суши и динамику их пространственно-временных изменений.

Неравномерность распределения наземных пунктов измерений (посты, станции, скважины и др.) обуславливает недостаток исходных данных для конкретной территории, особенно – труднодоступной для наблюдений. Это актуально для оценки водных ресурсов в высокогорной местности со снежным покровом или ледниками. Несмотря на важную и нередко определяющую роль вод суши в гидрологическом, энергетическом и биохимическом циклах, их количество и динамика изменений в региональном и глобальном масштабах все же остаются слабо изученными из-за недостатка наблюдений и отсутствия систематического мониторинга. Большое значение имеют связь изменения баланса и режима поверхностных и подземных вод с климатическими процес-

сами и изучение этих процессов на различных уровнях обобщения.

Международный спутниковый эксперимент по определению гравитации и климатических изменений (GRACE) проводится с 2002 г. для измерения пространственно-временных вариаций гравитационного поля Земли. Это система дистанционного определения изменений силы тяжести, связанных с массопотоками в земной коре. Последние могут быть обусловлены, в частности, круговоротом воды в пределах крупных речных бассейнов и даже континентов, вызванным процессами климатических изменений в последние десятилетия.

**ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВЕ  
И РАБОТЕ СПУТНИКОВОЙ  
СИСТЕМЫ GRACE**

GRACE – первая реализация концепции “от спутника к спутнику”, впервые описанной еще в 1969 г. Основная ее идея состоит в том, что движение спутников по орбите определяется гравитационным полем Земли. Изучая характер изменения расстояний между двумя спутниками, летящими по одной орбите, можно получить более

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00467, 09-05-92001-ННС), НОЦ (госконтракт 02.740.11.0336).

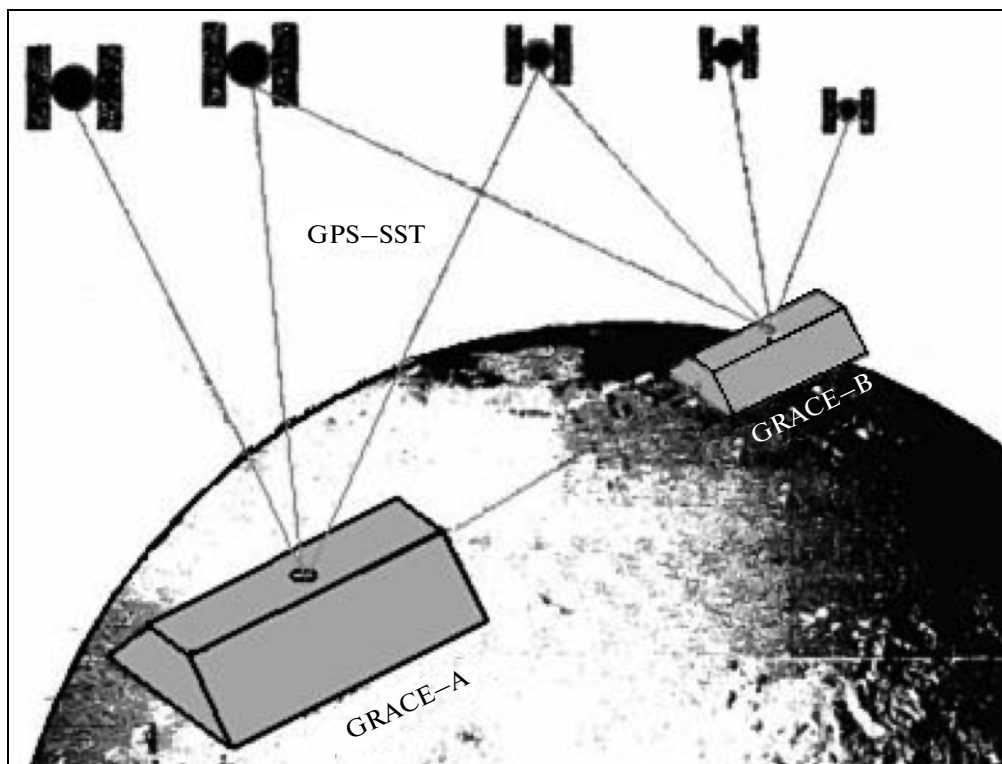


Рис. 1. Принципиальная схема расположения и работы космических аппаратов GRACE [3].

надежные и детальные данные о распределении поля силы тяжести и его потенциала, чем при изучении характера орбиты только одного спутника.

По проекту GRACE спутники находятся на орбите высотой 500 км под углом наклона  $0.5^\circ$  к оси вращения Земли (рис. 1). Расстояние между спутниками составляет в среднем 220 км [3] и измеряется с высокой точностью в микроволновом (K-band) диапазоне (частоты 10 900–36 000 ГГц) с помощью установленных на них лазерных дальномеров. Пространственное положение спутников определяется с помощью системы GPS. Кроме того, для получения более точных данных о характере поведения спутников на орбите на них расположены трехосные акселерометры, которые учитывают влияние на движение спутников таких сил, как солнечное давление, сопротивления атмосферы и др.

Расчет гравитационного потенциала по вариациям расстояния между спутниками становится возможным после удаления помех негравитационного характера, получаемых с акселерометров [4, 6].

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ С СИСТЕМЫ GRACE И РАСЧЕТ АНОМАЛИЙ ВОДНЫХ МАСС

За сутки спутники GRACE полностью проходят по своей орбите 15 раз, т.е. время повторного

прохождения спутника 1 ч 40 мин. За суточный период не обеспечивается достаточно густое покрытие всей поверхности Земли измерениями, поэтому система выполняет накопление данных за 30-дневный период [6]. Хотя пространственное разрешение регистрируемых данных в среднем составляет 300 км, оно сильно зависит от времени их накопления.

Предобработка получаемых со спутников данных (информация о позиции и скорости спутников по GPS, измерения акселерометров) осуществляется различными исследовательскими группами с периодами 1 мес. и 10 сут. По результатам обработки данных эти группы предоставляют оценки коэффициентов Стокса (безразмерные коэффициенты при сферических гармониках гравитационного потенциала) с порядком разложения (номерами гармоник) от 50 до 120. В процессе обработки значения полученных коэффициентов корректируются в соответствии с изменчивостью масс в атмосфере и океане по существующим моделям циркуляции. Таким образом, коэффициенты Стокса дают информацию о вариациях плотности внутри Земли, включая изменения содержания воды на речных водосборах и ледовых масс в высокогорьях и высоких широтах. К сожалению, коэффициенты также содержат ошибки корректирующих моделей и случайных помех.

Для обработки данных о гравитационном поле используется метод “динамического подхода”, основанный на ньютоновской формулировке уравнений движения спутников в инерциальной геоцентрической системе отсчета с использованием моделирования воздействия гравитационных и неконсервативных сил. Гравитационные силы оцениваются путем минимизации ошибок наблюдения по методу наименьших квадратов, подробно рассмотренном в [4]. Серьезная проблема состоит в учете систематических негравитационных влияний, вызванных, например, приборной погрешностью.

Перераспределение водных масс на Земле при вариации объемов вод суши вызывает пространственно-временные изменения поверхности геоида. Постоянная составляющая потенциала гравитационного поля  $G_0$  включает в себя почти 99% всего поля. Переменная составляющая  $\delta G(t)$  рассчитывается как разность между изменениями геоида за месячный период  $G(t)$  и постоянной составляющей [4]:

$$\delta G(t) = G(t) - G_0. \quad (1)$$

Разности геоидов за месяц отражают, прежде всего, кратковременные изменения высот геоида, связанные с перераспределением поверхностных масс.

Изменения высот геоида в общем виде для момента времени  $t$  можно представить следующим соотношением:

$$\delta G(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (\delta C_{nm}(t) \cos(m\lambda) + \delta S_{nm}(t) \sin(m\lambda)) P_{nm}(\cos \theta), \quad (2)$$

где  $\delta C_{nm}(t)$  и  $\delta S_{nm}(t)$  – нормализованные коэффициенты Стокса, выраженные в миллиметрах или сантиметрах высоты геоида;  $P_{nm}$  – присоединенные полиномы Лежандра ( $n$  и  $m$  определяют номер гармоники и порядок разложения),  $\theta$  – коширота (широта, отсчитываемая от полярной оси) расчетной точки.

Таким образом, коэффициенты Стокса  $\delta C_{nm}(t)$  и  $\delta S_{nm}(t)$  описывают характер отклонения поля высот геоида от нормальной модели  $G_0$  [2, 3]. Эти коэффициенты могут быть рассчитаны по формулам

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} \delta C_{nm}(t) \\ \delta S_{nm}(t) \end{array} \right\} = \\ & = \frac{1 + k'_n}{2n + 1} \frac{R^2}{M} \iint_S \delta q(\theta, \lambda, t) \left\{ \begin{array}{l} \cos(m\lambda) \\ \sin(m\lambda) \end{array} \right\} P_{nm}(\cos \theta) dS, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta q$  – поверхностное распределение масс, зависящее от географических координат ( $\theta$ ,  $\lambda$ ) и времени  $t$ ;  $M$  и  $S$  – общие масса и площадь поверхности Земли,  $R$  – средний радиус Земли (~6371 км),  $N$  – максимальная степень разложе-

ния (в общем случае бесконечна, но на практике ее задают конечным числом, которое определяет пространственное разрешение метода:  $\sim nR/N$ ). Число Лява  $k'_n$  вводится для учета упругой компенсации земной поверхности по отношению к вариациям масс.

Коэффициенты Стокса по данным спутников GRACE определяются за периоды 1 мес., реже 10 сут. После вычитания из данных, полученных по спутникам GRACE, коэффициентов, соответствующих постоянному полю  $G_0$ , вычисляются остаточные коэффициенты  $\Delta C_{nm}(t)$  и  $\Delta S_{nm}(t)$ , по которым в дальнейшем можно определить аномалии водных масс для соответствующего периода внутри участка поверхности площадью  $S$ . Это может быть осуществлено на основании соотношения [3]:

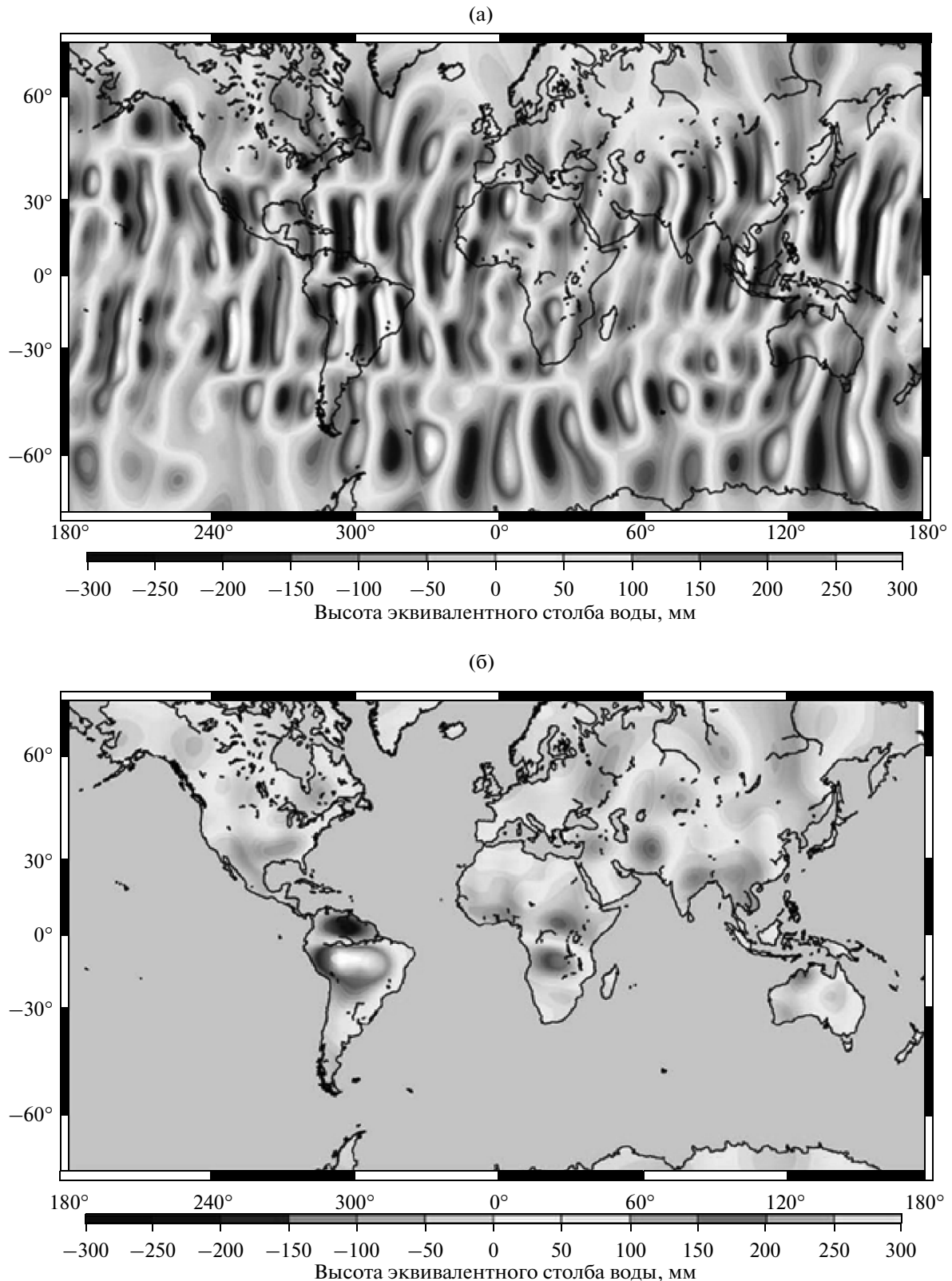
$$\begin{aligned} \Delta \sigma_S(\Delta t) = \\ = \frac{\rho_e R}{3S} \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k'_n} \{ \Delta C_{nm}(\Delta t) A_{nm} + \Delta S_{nm}(\Delta t) B_{nm} \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\rho_e$  – средняя плотность земного вещества (~5517 кг/м<sup>3</sup>);  $A_{nm}$  и  $B_{nm}$  – некоторые коэффициенты, выбранные в соответствии с особенностями данного региона. В частном случае эти коэффициенты могут быть выбраны равными единице внутри области  $S$  и нулю – вне ее.

Для устранения “полосчатости” (аномалий вдоль траектории наблюдения, неизбежно возникающих при съемке) используются различные методы сглаживания данных – фильтр Гаусса или сглаживание оператором на основе многочлена Лагранжа [3]. Разработка оптимального алгоритма фильтрации данных GRACE с выделением и сохранением необходимой информации – одна из существенных проблем анализа получаемых данных (рис. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ СО СПУТНИКОВ GRACE

В [3–7] приведены результаты ряда исследований для получения надежной информации по технологии GRACE над территориями крупнейших водосборных бассейнов. Основное внимание уделено минимизации высокочастотного шума и повышению точности измерений. Результаты исследований показали, что точность тем выше, чем больше площадь и время исследования. Система спутниковых дистанционных измерений способна регистрировать изменения водного баланса на площади более 200000 км<sup>2</sup> за время 1 мес., 1 год и более длительные периоды. Точность месячных измерений ~1.5 см. Анализировались данные съемок снежных покровов, скоплений поверхностных и подземных вод, увлажненных почв.



**Рис. 2.** Пример результатов глобальной съемки по технологии GRACE, полученных за один месяц (апрель 2003 г.): а – неотфильтрованные данные с меридиональными помехами и темными пятнами возможного скопления вод суши на общем сером фоне, б – результаты сглаживания по методу наименьших квадратов за тот же период. Максимальная степень разложения  $N = 50$  (разрешение  $\sim 400$  км) [4].

Выявлены соотношения между разрешениями съемки по времени и по размерам в плане. Установлено, что для получения пространственного разрешения переменного поля в 400 км необходимо накопление данных за 1 мес., чтобы обеспечить сплошное покрытие поверхности. Следовательно, в этом случае числа  $\{\Delta C(t), \Delta S(t)\}$  нужно рассматривать как усредненные по периоду ( $\Delta t$ )  $\sim 1$  мес. Поскольку плотность или степень покрытия участка съемки зависит от времени осреднения, то, чем меньше  $\Delta t$ , тем хуже разрешение. Напротив, увеличение периода измерений повышает разрешение съемки по пространству, но снижает его по времени. Поэтому для разных целей используются данные съемки различной продолжительности [6].

Базы данных измерений гравитационного поля системой GRACE доступны в Интернете по адресам, приведенным в [3].

Сравнения данных GRACE с результатами гидрологических расчетов и наземных гидрометрических измерений показали их взаимную согласованность.

В общем виде уравнение водного баланса имеет вид

$$\Delta W = P - E - R,$$

где  $P$ ,  $E$  и  $R$  – соответственно величины атмосферных осадков, испарения и стока, мм/год. Данные GRACE согласуются с расчетами уравнения, хотя иногда они превышают наземные измерения. Выполненные сопоставления свидетельствуют о хорошей корреляции между данными GRACE и гидрологическими расчетами по бассейнам рек Амазонки, Меконга, Конго, Миссисипи и ряда других (рис. 3). Аналогичное сопоставление данных проведено по бассейнам и других крупных рек за 2003–2006 гг. [4, 6]. Данные GRACE можно использовать для оценки колебаний уровня воды не только для крупных речных бассейнов, но и отдельных регионов.

Оценка речного стока по результатам спутниковой съемки проводилась с учетом водного баланса суши [7]. Для каждого месяца баланс рассчитывался как разность между значениями для текущего и следующего месяцев. Результат сопоставления выполненных расчетов стока по GRACE и водному балансу признан удовлетворительным. Следует отметить, что между результатами съемок GRACE и гидрологическими расчетами могут быть определенные расхождения как по величине водных ресурсов, так и по их динамике во времени [4, 7].

Для оценки возможностей рассматриваемого метода проведено сопоставление измерений современных годовых стоков рек Волги (створ Верхне-Лебяжье) и Лены (створ Табага) с результатами спутниковых измерений по технологии

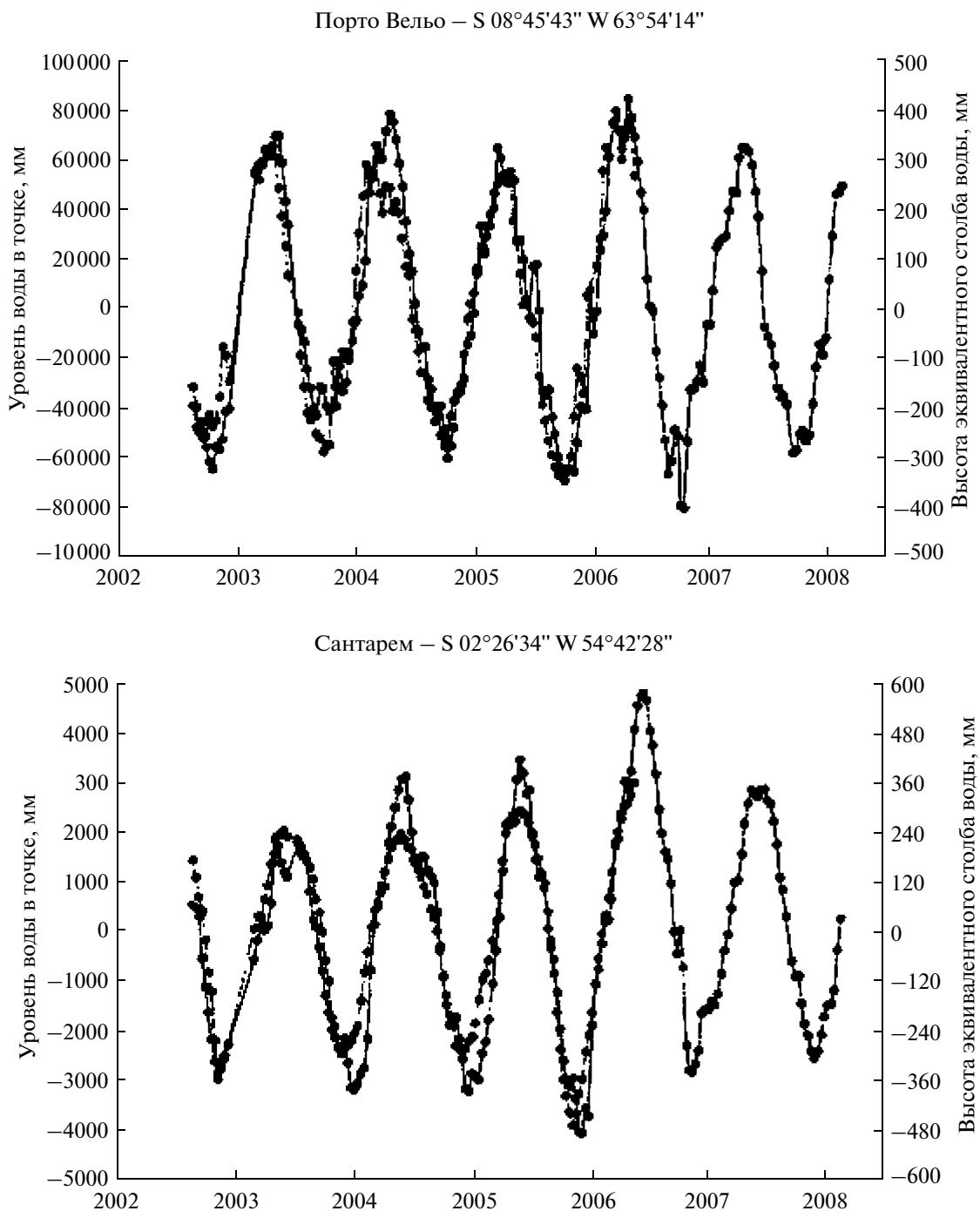
GRACE, приведенных в [7]. Графики рассчитанных и измеренных годовых расходов рек свидетельствуют о согласованном ходе кривых (рис. 4). Однако расчетные величины годового расхода Волги по GRACE имеют некоторое расхождение с данными наземных измерений. Общая среднеквадратическая невязка между приведенными величинами стока составляет  $6.6 \text{ км}^3/\text{мес}$ . Следовательно, хотя приведенные оценки близки между собой, относительная точность метода GRACE (здесь в качестве показателя относительной точности авторами использовалось отношение среднеквадратической невязки к максимальному измеренному расходу) составляет  $\sim 23\%$ . По аналогичным оценкам, относительная точность для р. Лены составляет 33%, и наибольшее расхождение между значениями стока по данным GRACE и по данным наземных измерений наблюдается в третьем и пятом месяцах года ( $23.2 \text{ км}^3/\text{мес}$ ).

Наблюдаемое превышение расчетных значений речного стока над измеренными можно объяснить ошибками осреднения данных GRACE по крупным водосборным бассейнам Волги и Лены, а также искажающим влиянием влаги в атмосфере (осадки и эвапотранспирация) в различных климатических зонах [8]. Согласованный ход кривых годовых расходов рек на графиках позволяет полагать, что точность измерений по GRACE может быть в дальнейшем повышена при их дополнении контрольными данными наземных измерений по существующей гидрометрической сети.

По данным GRACE возможна оценка изменений уровня грунтовых вод (УГВ). Так, установлена высокая корреляция между расчетами по GRACE и результатами непосредственных измерений УГВ (коэффициент корреляции 0.8–0.9) по скважинам в Иллинойсе, Оклахоме и на Великих Равнинах (США) [3]. Погрешность измерения УГВ на площади в  $450000 \text{ км}^2$  составила  $\sim 8.7$  мм при амплитуде колебаний от 20 до 45 мм за периоды 1 и 4 года соответственно. Мониторинг УГВ может проводиться с достаточной точностью на основе съемок GRACE при их комбинировании с наземными измерениями уровня подземных вод и почвенной влаги.

По данным съемки GRACE можно проводить регулярные наблюдения (мониторинг) за динамикой изменения УГВ в пределах крупных территорий под влиянием изменений естественных условий питания подземных вод (вариации климата) или их неконтролируемого использования. На рис. 5 приведен график снижения УГВ и истощения ресурсов подземных вод в результате их эксплуатации.

Следовательно, мониторинг режима и ресурсов вод с учетом их использования можно проводить с минимальным сбором дополнительных наземных данных. Это, безусловно, актуально, по-



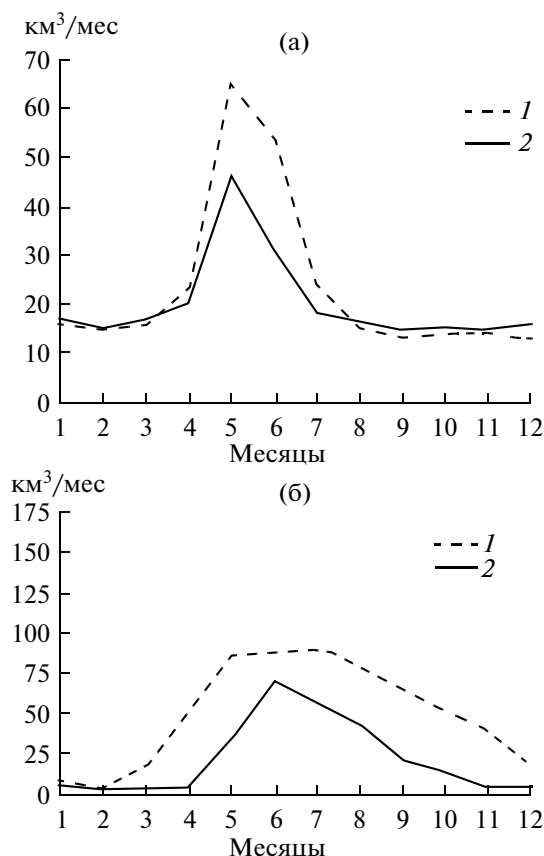
**Рис. 3.** Колебания уровня воды по данным гидрометрических измерений (светлая линия) и высота эквивалентного слоя воды по сигналам GRACE (темная линия) в бассейне Амазонки (посты Порто Вельо и Сантарем). График данных GRACE получен с осреднением за 10 сут и разрешением 400 км [3].

скольку для многих труднодоступных регионов с редкими гидролого-гидрологическими наблюдениями космические методы дают, пожалуй, единственную возможность для оценки изменений количества ресурсов подземных и поверхностных вод.

По данным съемки GRACE выявлены тенденции в таянии ледовых покровов Гренландии и Ан-

тарктиды и проведена оценка состояния покровных оледенений.

По материалам Центра космических исследований Техасского университета, потери льда в Западной Антарктике оцениваются в ~132, в Восточной — ~57 км<sup>3</sup>/год (рис. 6). Считалось, что при глобальном потеплении льды Антарктиды бу-



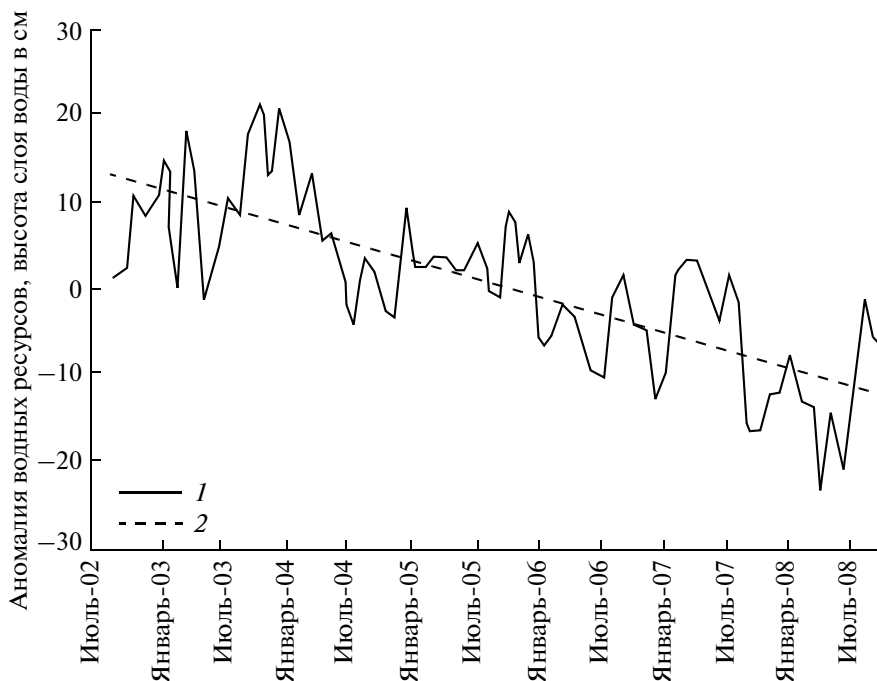
**Рис. 4.** Сравнение рассчитанных значений годового стока по информации GRACE (1) с данными наземных измерений ИВП РАН (2) для водосборных бассейнов Волги (а) и Лены (б).

дуг подвержены таянию на  $\sim 150$  км<sup>3</sup>/год и более. По расчетным данным, приведенным в [1], скорости сокращения массы льда на Северо-Антарктическом п-ове и в прибрежных районах Стэнкомб-Виллис и Земли Королевы Мод равны соответственно  $28.8 \pm 7.9$ ,  $81 \pm 17$  и  $16.7 \pm 9$  км/год. Однако, по данным съемок GRACE, за последнее время баланс льда Антарктиды близок к нулю [1].

Скорость таяния льда в Гренландии, согласно данным GRACE, составляет  $\sim 82$  км<sup>3</sup>/год, а по модельным расчетам с учетом наземных измерений –  $101$  км<sup>3</sup>/год (рис. 7). С 2000 по 2008 г. суммарные потери льда достигли  $1500$  км<sup>3</sup>. Этого объема достаточно для повышения уровня моря на  $0.46$  мм/год.

Следует отметить согласованность данных GRACE и лазерного сканирования с самолета на юге Аляски ( $101 \pm 22$  и  $96 \pm 35$  км<sup>3</sup>/год соответственно). Получены также данные по ледникам Патагонии, где мощность льда меняется на  $-1.6$  мм/год, или  $-27.9$  км<sup>3</sup>/год [1].

*Улучшение информативности и качества данных GRACE.* При всей оперативности и относительной точности измерений по технологии GRACE еще остается проблемой низкая разрешающая способность выходных данных и низкое пространственное разрешение метода (300–400 км). Следует отметить недостаточную точность и низкую надежность измерений GRACE при оценке роли различных составляющих водных ресурсов. Точность получаемых результатов повышается при



**Рис. 5.** Изменение уровня грунтовых вод на территории Индии (Индо-Гангская низменность) с 2002 по 2008 г. по данным GRACE [5]: 1 – изменение запасов грунтовых вод, 2 – линейный тренд изменения запасов грунтовых вод.

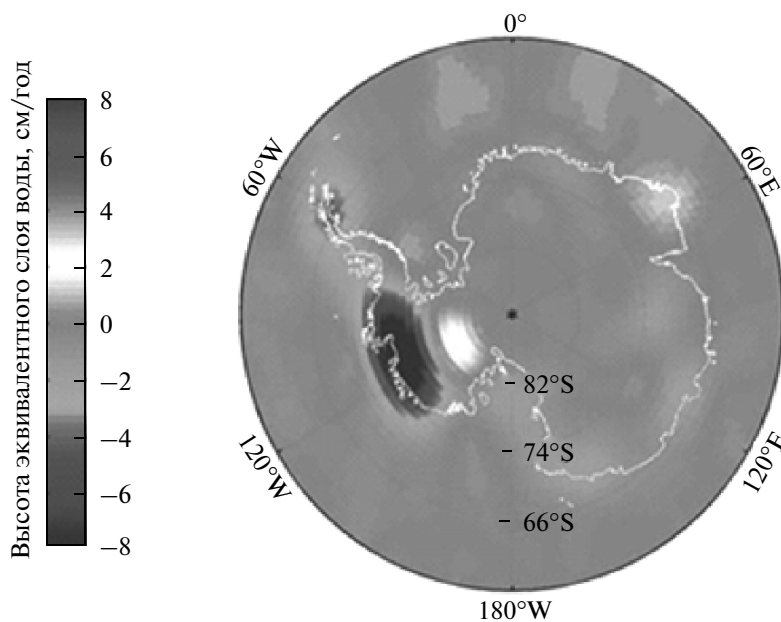


Рис. 6. Карта изменения водных масс в приполярных широтах, рассчитанная по 10-дневным периодам измерений GRACE (2002–2006 гг.). Области значительного таяния ледового покрова выделяются темными пятнами в западной части Антарктиды [1].

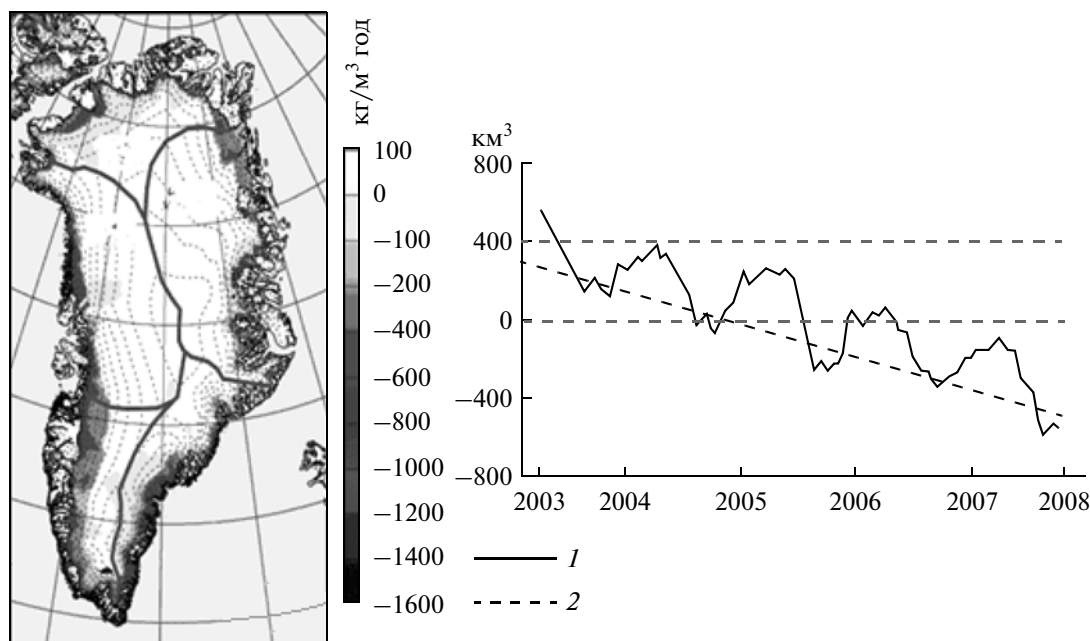


Рис. 7. Карта изменений площади и массы ледового покрова о. Гренландия и график изменений объема ледового покрова с 2003 по 2008 г. (1) с линейным трендом (2) [9].

увеличении размеров речного бассейна. Последняя модель GRACE RL04 имеет более высокую точность определения речного стока [6]. При более широком привлечении существующих компьютерных моделей формирования вод суши и данных наземного мониторинга можно добиться большей точности оценки гидролого-гидрогео-

логических характеристик, полученных с использованием данных GRACE [10].

### ВЫВОДЫ

Спутниковая гравиметрия GRACE – современный метод дистанционного изучения Земли.



Кроме решения задач геодезии и геофизики, связанных непосредственно с гравиметрической съемкой, технология GRACE позволяет получать реальные данные об изменении водных ресурсов суши при континентальном и региональном уровнях осреднения. Метод может успешно применяться в мониторинге речного стока, таяния ледников, изменений уровня грунтовых вод на больших площадях, а его точность зависит от уровня помех и фильтрации данных.

Необходимо улучшать качество гравитационной съемки с выделением и детализацией слабых сигналов. Кроме того, существенное ограничение разрешающей способности (300 км) делает метод пригодным лишь для задач региональной гидрологии и гидрогеологии. Для сравнения можно отметить, что стартовавшая в 2009 г. гравиметрическая система спутников по программе GOCE, в устройстве которой, как и в GRACE, использован градиентометр на акселерометрах, регистрирует гравитационное поле с разрешением ~100 км. Кроме того, существует обратная связь между разрешениями временной и пространственной информации, которая влияет на выбор площади и периода исследований. Для решения этих проблем требуется более широкое привлечение данных наземного мониторинга компонентов среды.

Повышение качества съемки и обработки данных GRACE позволит использовать эту дистанционную информацию для решения широкого круга задач, в том числе — для контроля изменения регионального состояния водных ресурсов под влиянием климатических и антропогенных факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen J.L., Wilson C.R., Blankenship D., Tapley B.D.* Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. № 12. P. 859–862.
2. *Mikhailov V., Tikhotsky S., Diament M. et al.* Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 228. № 3, 4. P. 281–297.
3. *Ramillien G., Famiglietti J.S., Wahr J.* Detection of Continental Hydrology and Glaciology Signals from GRACE: A Review // *Surveys in Geophys.* 2008. V. 29. № 4, 5. P. 361–374.
4. *Ramillien G., Frappart F., Cazenave A., Gunther A.* Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 235. № 1, 2. P. 283–301.
5. *Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J.S.* Satellite-based estimates of groundwater depletion in India // *Nature*. 2009. V. 460. № 7258. P. 999–1002.
6. *Schmidt R., Flechtner F., Meyer U.* Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites // *Surveys in Geophys.* 2008. V. 29. № 4, 5. P. 319–334.
7. *Syed Tajdarul H., Famiglietti J.S.* GRACE-Based Estimates of Terrestrial Freshwater Discharge from Basin to Continental Scales // *J. Hydrometeorology*. 2009. V. 10. № 1. P. 22–40.
8. *Syed Tajdarul H., Famiglietti J.S., Rodell M. et al.* Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS // *Water Resources Research*. 2008. V. 44. P. 1–15.
9. *Witze A.* Climate change: Losing Greenland // *Nature*. 2008. V. 452. № 7182. P. 798–802.
10. *Zaitchik B.F., Rodell M., Reichle R.* Assimilation of GRACE Terrestrial Water Storage Data into a Land Surface Model: Results for the Mississippi River Basin // *J. Hydrometeorology*. 2008. V. 9. № 3. P. 535–548.