

УДК 550.831

Н.С. Ткаченко<sup>1</sup>, И.В. Лыгин<sup>2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ GRACE ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Приведено описание спутниковой миссии GRACE и сделан краткий обзор географических и геологических задач, которые были успешно решены благодаря применению данных, полученных с ее помощью. GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) — гравитационная спутниковая миссия, цель которой состоит в составлении точной карты изменения гравитационного поля Земли. Получаемые данные обладают высокой точностью, что позволяет решать множество геологических и географических задач.

*Ключевые слова:* GRACE, спутниковая миссия, гляциология, гидрология, океанография, геодинамика, геопотенциал.

In this article we provide the literature review of the geological and geographical problems which were successfully solved due to application of GRACE satellite mission data. GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) is gravitational satellite mission the purpose of which is precise mapping of variations of Earth's gravity field. The data has high resolution that gives the opportunity to solve a lot of geological and geographical problems.

*Key words:* GRACE, satellite mission, glaciology, hydrology, oceanography, geodynamics, geopotential.

**Введение.** 17 марта 2002 г. по инициативе НАСА (NASA) и Джерман Аэроспэйс Центр (German Aerospace Center, DLR) была запущена миссия ГРЕЙС (GRACE, Gravity Recovery And Climate Experiment). Она представляет собой два идентичных спутника, летящих по одной орбите на расстоянии 200 км между собой и на высоте 500 км над поверхностью Земли. За месяц спутники совершают 480 оборотов вокруг Земли по полярной орбите (наклон составляет около 89° к экватору). Первоначально миссия была запланирована на 5 лет, ее цель — получение точных глобальных моделей компонент гравитационного поля Земли и изучение его изменений в течение срока выполнения. При благоприятных условиях расстояние между треками составляет всего 0,5°. В результате за счет плотного облака наблюдений и большой статистики предполагалось получить осредненную модель гравитационного поля с большой детальностью и точностью.

Однако миссия остается до сих пор активной, измерения выполняются непрерывно уже более 15 лет. Длительная выборка наблюдений позволила скорректировать цель миссии на изучение долговременных изменений поля силы тяжести.

Нами выполнен обзор современных задач в области географии и геологии, которые используют результаты миссии GRACE.

**Физико-математические основы метода.** Преимущество данных, полученных GRACE, состоит в том, что благодаря использованию двух спутников

качество наблюдений не зависит от типа поверхности Земли, над которой проводятся наблюдения. Если более ранние альтиметрические миссии, например, Топекс-Посейдон (Торех-Poseidon), могли получать детальную информацию только над акваториями, а односпутниковые гравиметрические миссии (например, Гоче, GOCE) обладали относительно невысокой точностью, то миссия GRACE регистрирует параметры гравитационного поля над акваториями и сушей (в том числе над горными сооружениями и ледниками) с одинаково высокой точностью.

Из-за того, что форма орбиты спутников представляет собой эквипотенциальную поверхность гравитационного потенциала Земли, изменение расстояния между двумя идентичными спутниками, следующими один за другим по одной орбите, отражает неоднородность гравитационного поля. В общем случае вертикальные и горизонтальные смещения одного спутника относительно другого (с учетом всех остальных факторов, являющихся погрешностями измерений) характеризуют значения компонент гравитационного потенциала (силу тяжести и ее градиенты, кривизну эквипотенциальной поверхности и пр.).

В теории гравиметрии гравитационный потенциал в некоторой точке  $P$ , внешней по отношению к Земле, представляется в виде ряда разложения по полиномам Лежандра (набор сферических гармоник):

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирантка; *e-mail:* kostinans@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* lygin@geophys.geol.msu.ru

$$V(r, \varphi, \lambda, t) = \frac{G}{r} + \frac{G}{r} \sum_{l=2}^{N_{\max}} \left( \frac{a_e}{r} \right)^l \times \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin \varphi) \{ \bar{C}_{lm}(t) \cos m\lambda + \bar{S}_{lm}(t) \sin m\lambda \}, \quad (1)$$

где  $C, S$  — коэффициенты Стокса;  $G$  — гравитационная постоянная Земли;  $a_e$  — средний экваториальный радиус;  $t$  — время. Точка  $P$  характеризуется геоцентрическим радиусом ( $r$ ), географическими широтой ( $\varphi$ ) и долготой ( $\lambda$ ).

Для получения непосредственно значений гравитационного потенциала решается задача (обратная) по подбору таких параметров потенциала (коэффициентов Стокса), при которых существовала бы эквипотенциальная поверхность заданной формы, вдоль которой перемещались спутники.

Благодаря использованию микроволновых дальномеров, установленных на спутниках, и высокоточной пространственной привязке с помощью системы GPS, регистрируются изменения расстояния между спутниками с точностью несколько десятков микронов [Tapley et al., 2004]. С учетом указанного и весьма представительной статистики наблюдений (в результате многократного повторения орбит спутниками) к настоящему времени значения коэффициентов Стокса рассчитаны с точностью до 10-го знака после запятой, модель гравитационного потенциала включает 180 гармоник. Модель аномального поля силы тяжести, получаемая на основе модели гравитационного потенциала, вычисляется с погрешностью до десятых долей мкГал.

В формуле (1) значения гравитационного потенциала зависят не только от плановых координат, но и от времени. В результате многократного повторения орбит на протяжении более чем 15 лет временные изменения гравитационного потенциала также оказываются зарегистрированными и поддающимися обработке.

**Результаты обработки данных.** Полученные в ходе полета исходные данные, включающие точные значения изменения расстояния между спутниками и другие телеметрические параметры, передаются на Землю, где обрабатываются в трех институтах, официально обеспечивающих выполнение миссии: в Центре космических исследований (Center for Space Research, Университет Техаса, Остин, США), Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, Калифорния, США) и в Немецком исследовательском центре Гельмгольца (Helmholtz-Zentrum Deutsches GeoForschungsZentrum, Потсдам, Германия). Обработка данных проводится в несколько этапов.

В данные нулевого уровня (Level-0, исходные) вводятся корректировки за положение спутников,

а также их орбиты, показания GPS, акселерометров, звездных камер, состояние бортовых научных инструментов и т.д. Полученные в результате данные первого уровня (Level-1) имеют точную привязку по времени [Case et al., 2002].

Затем к данным первого уровня применяется математическая обработка, а именно рассчитывается обратная задача с регуляризацией, вводятся поправки на эффект наложения частот и т.д. В результате получают данные второго уровня (Level-2), представляющие собой разложение ежемесячного гравитационного потенциала по сферическим гармоникам на сфере с радиусом, равным среднему радиусу Земли [Bettadpur, 2012].

В ходе миссии создаются последовательные версии (Release) продуктов уровней Level-1 и Level-2, отличающиеся постепенным улучшением пространственного и временного шага дискретизации (разрешения). Каждое новое повышение точности обработки обеспечивается в первую очередь добавлением новых фактических данных. Начальные версии обработки (Release-01, -02) были получены с временным разрешением 1,5 сут и шагом в пространстве  $2 \times 2^\circ$ , версия обработки Release-05 содержит данные с пространственным шагом  $1 \times 1^\circ$  и временным разрешением 1 сут [Dahle et al., 2013].

Обработанные данные находятся в открытом доступе на официальных сайтах всех институтов, например URL: <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/> или URL: <http://www.csr.utexas.edu/grace/>, и обновляются ежемесячно.

Данные о гравитационном потенциале сохраняются в виде набора коэффициентов Стокса и статических поправок за расчетный период, как правило, за месяц в файлах GRACE Gravity Model (GGM). Это могут быть как данные только GRACE, так и их комбинация с наземными исследованиями. Последнее повышает точность разложения потенциала Земли по гармоникам.

До запуска миссии GRACE гравитационная модель Земли включала 60 сферических гармоник, и точность определения эквипотенциальной поверхности составляла около 40–50 мм (с учетом альтиметрии над акваториями она повышалась до 20–30 мм). Модель базировалась на менее точных результатах предыдущих спутниковых миссий, в первую очередь альтиметрических. Последние позволяют методически восстановить высоты геоида только над морскими акваториями. Поэтому наибольшие погрешности предыдущих моделей приходились не просто на сушу, но на районы со сложной геоморфологией, такие, как крупные горные системы.

Последняя модель GGM-05 (март 2003 — май 2015) — самая полная, состоит из 180 гармоник, значения коэффициентов Стокса рассчитаны с точностью до 10-го знака после запятой, погрешность определения формы эквипотенциальной

поверхности составляет 20–30 мм для всей поверхности Земли.

**Решаемые задачи.** Чаще всего в исследованиях применяются данные Level-2 выпуска «Release-05», реже 4-го выпуска. Погрешность определения компонент гравитационного поля с помощью описываемой методики по точности практически не уступает высокоточным наземным измерениям гравитационного поля на стационарных гравиметрических станциях.

На рисунке видно, что значения гравитационного поля, полученные с помощью GRACE, с высокой степенью дополняют (детализируют) изменения, зарегистрированные наземными абсолютными гравиметрами. Различия как в самих значениях, так и линейных трендовых составляющих обусловлены в первую очередь тем, что данные GRACE отражают интегральное изменение гравитационного поля, произошедшее как минимум на площади размером  $1 \times 1^\circ$  в течение месяца, а не изменение в конкретном пункте абсолютного измерения. В изменениях в пределах такой одноградусной тра-

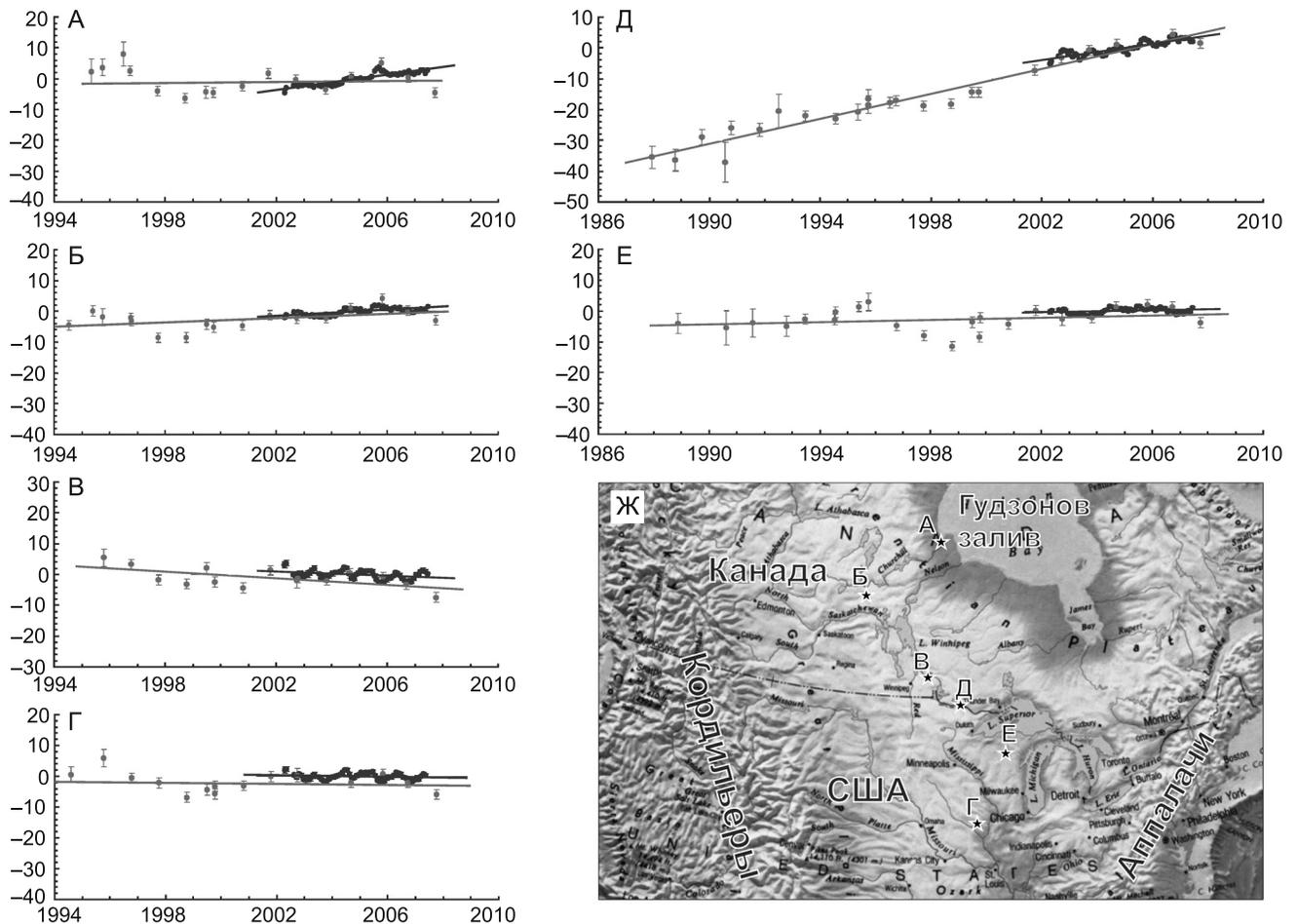
пеции участвуют все плотностные флуктуации как в атмосфере, так и в земных оболочках (включая гидросферу и твердые оболочки).

Гравиметрические задачи миссии GRACE включают два основных научно-практических направления: построение глобальной модели гравитационного поля Земли и регистрация изменения гравитационного поля во времени.

*Первое направление* — фундаментальная задача гравиметрии и геодезии, с утилитарной точки зрения необходимая для усовершенствования систем отсчета координат для расчета орбит космических аппаратов при запуске и эксплуатации в околоземном пространстве, для повышения точности систем определения координат, использующих навигационные (геодезические) спутники позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и др.).

С точки зрения геологии уточненные данные о гравитационном поле необходимы для усовершенствования глубинной модели строения Земли.

Используя данные о значениях скорости сейсмических волн ( $V_p$ ), полученных при сейс-



Изменение относительных значений и линейных трендов гравитационного поля по данным абсолютных наземных измерений и ежемесячных оценок GRACE с 04.2002 по 06.2007 в центральной части Северо-Американского континента по [Lambert et al., 2007].

Звездочки — пункты абсолютных измерений: А — Flin Flon, Б — Pinawa, В — Iowa City, Г — Churchill, Д — International Falls, Е — Wausau; Ж — положение пунктов. На графиках по горизонтальным осям отложено время в годах, по вертикальным — вариации аномалий поля силы тяжести в мкГал; точки — вариации аномалий поля силы тяжести по данным GRACE (темные) и по данным абсолютных измерений (светлые); сплошные линии — линейные тренды

мической томографии, и гравитационное поле возможно уточнить глубинные модели распределения скорость–плотность, построенные ранее (Буллена, Джеффрисса, Сорохтина–Ушакова и др.) [Dziewonski, Anderson, 1981; Marussi et al., 1974].

*Второе направление.* Особый вклад спутниковые гравиметрические исследования внесли в такие области географии, как океанография, гляциология и гидрология, где необходима не просто информация о статическом поле, но важно знать, как меняется поле во времени.

В океанографии спутниковые гравиметрические исследования позволили детальнее изучить транспортировку массы и тепла океаническими течениями между разными регионами Земли. Объединив информацию о геоиде по данным GRACE, данные спутниковой альтиметрии, а также значения температуры и солёности, определенные непосредственно с морских судов, ученым Техасского университета удалось получить достаточно точные направления и значения скорости разных течений, в том числе и не крупных<sup>3</sup>.

В гляциологии данные GRACE позволяют решать следующие задачи:

1) расчет и контроль изменения массы льда в ледниках в разных регионах мира (Русский Север [Moholdt et al., 2012], Гренландия, Антарктика [Mémín et al., 2015] и Антарктида [Seo et al., 2015]);

2) разделение гляциального динамического масс-баланса и приповерхностного масс-баланса около Гренландии [Bonin, Chambers, 2015];

3) оценка гляцио-изостатической компенсации поднятия земной коры [Zhang, Jin, 2013];

4) изучение влияния пространственного распределения ледников и вечной мерзлоты на изменение водного стока в северо-западной части Китая [Xu et al., 2015].

В большинстве гидрологических задач данные GRACE используются для определения общего водонакопления, которое крайне трудно посчитать методами *in situ*. Этот параметр выражается в эквивалентном уровне водяного столба (ЭУВ). Вертикальной точности определения уровня воды в 15–20 мм достаточно для отображения сезонного гидрологического цикла крупных рек и бассейнов. В частности, спутниковые данные были успешно применены при решении следующих задач:

1) изучение водных запасов на поверхности и в приповерхностной части Земли, в частности, запасов крупных рек [Soni, Syed, 2015];

2) изменения водных запасов и климата в засушливых районах [Yang et al., 2015] и в холодных регионах [Wang et al., 2015];

3) изучение гидрологической динамики крупных заболоченных территорий [Penatti et al., 2015];

4) определение динамики некоторых крупных рек России [Булычев и др., 2011; Зотов и др., 2015].

В последнее время исключительно благодаря долговременности выполнения миссии GRACE стало возможным решать геологические задачи в области геодинамики.

В таких задачах информация об изменении гравитационного поля во времени и пространстве является основной при моделировании не только плотностного разреза, но и для установления полей геодинамических параметров (напряжений, скорости деформации и пр.). Объекты исследования — активные геодинамические районы, такие, как зоны субдукции, активного орогенеза и рифтинга. Подобные исследования выполняются как на основе только спутниковых данных, так и с привлечением дополнительных наземных геолого-геофизических материалов. Комбинирование спутниковой и наземной гравиметрии позволило смоделировать положение напряжения и скорость деформации в зоне Центральной Андской субдукционной зоны [Gutknecht et al., 2014].

Отдельная тема — изучение реакции литосферы на крупные землетрясения, произошедшие во время работы миссии GRACE. Под реакцией литосферы подразумеваются изменения в распределении значений плотности вблизи очага землетрясения, которые вызывают временные вариации поля силы тяжести, регистрируемые спутниками GRACE. Так, при изучении распространения косейсмических гравитационных изменений, вызванных Охотским глубинным землетрясением в 2013 г., выявлено, что данные GRACE чувствительны для картирования вертикальных смещений поверхности Земли, как на суше, так и в океанах [Kaftan et al., 2015].

В статье [Михайлов и др., 2014] выполнен сравнительный анализ косейсмических и постсейсмических временных вариаций глобального гравитационного поля по данным GRACE в областях трех катастрофических землетрясений (Андаман-Суматранское, Тохоку-Оки и Мауле-Чили). Выявленные расхождения в поведении временных вариаций гравитационного поля отражают геодинамическую обстановку, в которой происходит землетрясение. Анализ временных аномалий гравитационного поля позволяет не только отбраковать часть эквивалентных по наземным данным моделей поверхностей косейсмических разрывов, но численно смоделировать их продвижение на глубину и описать процессы вязкоупругой релаксации напряжений [Михайлов и др., 2014].

**Заключение.** Нами перечислены основные современные географические и геологические задачи, решаемые с применением данных спутниковой миссии GRACE. В настоящее время качество гравиметрических материалов, полученных

<sup>3</sup> URL: [www.csr.utexas.edu](http://www.csr.utexas.edu)

с помощью GRACE, не имеет аналогов. В ходе непрерывного 15-летнего цикла наблюдений создана модель гравитационного потенциала, включающая как стационарную часть поля, так и его изменения во времени. Модель состоит из 180 сферических гармоник с точностью коэффициентов разложения до 10-го порядка, что позволяет рассчитывать аномалии высот геоида с точностью 20–40 мм, аномалии поля силы тяжести — несколько мкГал, обеспеченные пространственным разрешением  $1 \times 1^\circ$  и временным разрешением в 1 месяц.

Однако обратим внимание на следующее. В рассмотренных задачах все временные вариации гравитационного поля, зарегистрированные спутниками, описываются исключительно с позиции одной конкретной проблемы. Например, в географических задачах (океанография, гидрология) все эффекты связывают с приповерхностными событиями (глубина несколько километров для акваторий при изучении морских течений и суши при изучении расходов бассейнов крупных рек).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бульчев А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Использование спутниковой системы GRACE для мониторинга изменений водных ресурсов // Недропользование XXI. 2011. № 2. С. 24–27.
- Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Телегина А.А. Изменение гравитационного поля в бассейнах крупных рек России по данным GRACE // Альманах современной метрологии. 2015. № 3. С. 142–158.
- Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Ляховский В.А. и др. Сравнительный анализ временных вариаций глобального гравитационного поля по данным спутников Грейс в областях трех недавних гигантских землетрясений // Физика Земли. 2014. Т. 2014, № 2. С. 29–40.
- Bettadpur S. Level-2 gravity field product user handbook // Center for Space Res. 2012.
- Bonin J.A., Chambers D.P. Quantifying the resolution level where the GRACE satellites can separate Greenland's glacial mass balance from surface mass balance // Cryosphere. 2015. Vol. 9, N 5. P. 1761–1772.
- Case K., Kruižinga G., Wu S. GRACE level 1B data product user handbook // JPL Publication. 2002.
- Dahle C., Fletchner F., Gruber C. et al. GFZ GRACE level-2 processing standards document for level-2 product release 0005 // GFZ German Res. Centre for Geosci. 2013.
- Dziewonski A.M., Anderson D. Preliminary reference earth model // Phys. of the Earth and Planet. Inter. Vol. 25. P. 297–356.
- Gutknecht B.D., G tze H.-J., Jahr T. et al. Structure and state of stress of the Chilean subduction zone from terrestrial and satellite-derived gravity and gravity gradient data // Surv. Geophys. 2014. Vol. 35. N 6. P. 1417–1440.
- Kaftan V.I., Sermiagin R., Zotov L. Gravity field // Geo Sci. 2015. N. 3. P. 22–29.
- Lambert A., Huang J., Courtier N. et al. Comparison of GRACE monthly estimates with surface gravity variations at North American sites. San Francisco: AGU Fall Meeting, 2007.
- Marussi A., Moritz H., Rapp R., Vicente R. Ellipsoidal density models and hydrostatic equilibrium // Interim Rep. Phys. of the Earth and Planet. Inter. 1974. Vol. 9. P. 4–6.
- Mémin A., Flament T., Alizier B. et al. Interannual variation of the Antarctic Ice Sheet from a combined analysis of satellite gravimetry and altimetry data // Earth Planet. Sci. Lett. 2015. Vol. 422. P. 150–156.
- Moholdt G., Wouters B., Gardner A.S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic: glacier mass changes, Russian Arctic // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. N 10.
- Penatti N.C., Almeida T., Ferreira L. et al. Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland // Remote Sens. Environ. 2015. Vol. 170. P. 1–13.
- Seo K.-W., Wilson C., Scambos T. et al. Surface mass balance contributions to acceleration of Antarctic ice mass loss during 2003–2013: Antarctic mass loss acceleration // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2015. Vol. 120, N 5. P. 3617–3627.
- Soni A., Syed T.H. Diagnosing land water storage variations in major Indian River basins using GRACE observations // Glob. Planet. Change. 2015. Vol. 133. P. 263–271.
- Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M. et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE mission overview and early results // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31, N 9.
- Wang S., Huang J., Yang D. et al. Long-term water budget imbalances and error sources for cold region drainage basins: cold region water imbalance // Hydrol. Process. 2015. Vol. 29, N 9. P. 2125–2136.
- Xu M., Kang S., Li J. Evaluation of water storage change of inland cryosphere in Northwestern China // Adv. Meteorol. 2015. Vol. 2015. P. 1–12.
- Yang T., Wang C., Chen Y. et al. Climate change and water storage variability over an arid endorheic region // J. Hydrol. 2015. Vol. 529. P. 330–339.
- Zhang T.Y., Jin S.G. Estimate of glacial isostatic adjustment uplift rate in the Tibetan Plateau from GRACE and GIA models // J. Geodyn. 2013. Vol. 72. P. 59–66.