

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.512

Л.В. Зотов¹, Н.Л. Фролова², В.Ю. Григорьев³, М.А. Харламов⁴ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ ГРАВИТАЦИИ ЗЕМЛИ (GRACE) ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОДНОГО БАЛАНСА КРУПНЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ⁵

Рассмотрена возможность использования данных спутниковой гравиметрии, полученных в ходе эксперимента GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) для решения различных гидрологических задач. Предыдущие исследователи отнесли месячные изменения гравитационного поля Земли на суше к движению водных масс внутри континентальной части гидрологического цикла. Технология GRACE позволяет получать реальные данные об изменении водных ресурсов суши при континентальном и региональном уровнях осреднения. Метод может быть применен при мониторинге речного стока, снежного покрова, таяния ледников, изменения уровня грунтовых вод на больших площадях. Описаны методы и особенности обработки данных.

Ежемесячные данные о гравитационном поле со спутников GRACE переведены в карты эквивалентного уровня воды и осреднены для бассейнов крупнейших рек России, рассмотрена временная изменчивость этой характеристики. Исследована возможность применения данных GRACE для оценки отдельных составляющих водного баланса крупнейших речных бассейнов на европейской территории России.

Ключевые слова: мониторинг, космическая гравиметрия, GRACE, водные ресурсы.

Введение. Спутники-близнецы «GRACE» (Gravity Recovery and Climate Experiment, Эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата), разработанные NASA/DLR, были запущены с космодрома в Плесецке российским носителем «Рокот» 17.03.2002. Спутниковая система GRACE (Германия–США) специально создана для измерения временных вариаций поля силы тяжести. Конструктивно она состоит из двух спутников, летящих на расстоянии 220 ± 50 км по одной и той же низкой орбите (~500 км). Слежение за траекториями этих спутников осуществляется с помощью системы высоколетящих спутников систем GPS (США) и GLONASS (Россия). Одновременно при помощи микроволнового дальномера проводится высокоточное измерение расстояния между спутниками, скорость изменения этого расстояния определяется градиентом силы тяжести. Кроме того, на борту спутника установлены акселерометры, позволяющие исключить влияние возмущающих сил. Именно высокая точность измерения расстояния между спутниками позволяет улавливать малейшие изменения

в силе притяжения к Земле. За сутки спутники «GRACE» полностью проходят по своей орбите 15 раз, т.е. время повторного прохождения спутника составляет 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.

Измеряемое между спутниками расстояние – исходная величина, содержащая информацию о гравитационном поле. Научные центры, расположенные в Геофизическом институте (GFZ, Потсдам, Германия), в Центре космических исследований (CSR, Остин, США) и в Лаборатории реактивного движения (JPL, Пасадена, США) обрабатывают эти данные, принимая к учету показания GPS, акселерометров, звездных камер и др., и получают продукт 1-го уровня (L1). Затем с использованием сложного алгоритма решения обратной задачи с регуляризацией [Tikhonov et al., 1998] и внесением поправки на изменения атмосферного давления над сушей и океаном на величину твердотельного, океанского, лунного прилива и др., получают данные 2-го уровня

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: wolftempus@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: frolova_nl@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирант; e-mail: vadim308g@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; e-mail: maks-cool@mail.ru

⁵ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-37-00038).

ня (L2), представляющие собой разложение ежемессячного гравитационного поля по значениям коэффициентов Стокса на сфере со средним радиусом Земли. При вычитании среднего поля из ежемесячных значений коэффициентов Стокса, получаемых с GRACE, можно наблюдать изменения от месяца к месяцу с точностью до мкГал (1 Гал = 0,01 м/с²). Ежемесячные файлы данных уровня L2 доступны на серверах GFZ, CSR и JPL, но для их использования необходима фильтрация меридиональных коррелированных шумов, называемых полосами или страйпами. Причины возникновения последних – полярные орбиты обоих спутников, недостаточно хорошее отражение гравитационного сигнала и др. Научные группы работают над созданием оптимальных алгоритмов фильтрации этих шумов в данных GRACE [Schmidt, 2008]. Пространственное разрешение регистрируемых данных в среднем составляет 300 км и сильно зависит от времени их накопления.

Система GRACE – система дистанционного определения изменений силы тяжести, связанных с массопотоками в земной коре. Короткопериодные вариации силы тяжести обусловлены процессами массопереноса в атмосфере и гидросфере, которые, в частности, выражаются в изменении уровня Мирового океана, влажности воздуха и почвы, изменении уровня грунтовых вод, таянии ледников. Конечно, изменения гравитационного поля во времени связаны не только с влиянием атмосферы и океана, но и с тектоническими факторами. В частности, свой вклад должны вносить изменения топографии земной поверхности, вызванные движениями литосферных плит (коллизия, рифтогенез, субдукция) и гляциоизостазией, а также мантийная конвекция, перераспределение масс в результате землетрясений, эрозии и седиментации. Исследования показали, что месячные изменения гравитационного поля Земли на суше в значительной степени можно отнести к движению водных масс внутри континентальной части гидрологического цикла [Wahr, 1998].

Таким образом, в настоящее время проект GRACE на основе спутниковых технологий выполняет глобальные наблюдения за изменением запасов воды в месячных интервалах и с пространственным разрешением от уровня крупных речных бассейнов (>200 000 км²) [Swenson, Wahr, 2002] до континентов [Syed Tajdarul, Famiglietti, 2008].

Недавние оценки изменения запасов воды показали хорошую согласованность данных гидрологических моделей и наблюдений [Frappart et al., 2011; Syed Tajdarul, Famiglietti, 2008]. Более того, месячные изменения запасов воды на суше, полученные GRACE, позволили рассчитать важнейшие составляющие гидрологического цикла, включая суммарное испарение, сток [Syed Tajdarul, Famiglietti, 2009], количество осадков минус испарение ($P-E$)

[Swenson, Wahr, 2006], изменение запасов подземных вод [Rodell et al., 2009], а также, что наиболее важно, невязку водного баланса в различном масштабе. Точность расчетов изменения запасов воды находится в пределах 1,5 см и менее в зависимости от географической области, для которой осреднены данные. Основные проблемы связаны с учетом и устранением помех разного рода.

Материалы и методы исследований. Изменения гравитационного поля со спутника раскладываются по сферическим и естественным ортогональным функциям, проводится фильтрация данных с тем, чтобы оставить сигнал, связанный с перераспределением вод суши и изменением водных масс океана. Подробное изложение процесса обработки исходной информации GRACE изложено в [Зотов и др., 2010; Chambers, 2006]. В результате из рядов аномалий силы тяжести получают ряды эквивалентной толщины водного слоя в узлах регулярной сетки $1 \times 1^\circ \text{C}$ с интервалом 1 месяц.

В свободном доступе есть данные с разной степенью предварительной обработки (например, URL:<http://geoid.colorado.edu/grace>). В нашем случае источником информации послужил сайт Калифорнийского технологического института [(URL:<http://grace.jpl.nasa.gov/data/gracemonthlymassgridsland>)], где размещены данные в версии RL05-01 (с вычитом атмосферной составляющей из слоя влагозапаса) для поверхности суши, с пространственно-временным разрешением $1 \times 1^\circ$ на один месяц в формате NetCDF. Результаты последовательной и весьма сложной обработки гравиметрических данных преобразованы в эквивалентный уровень воды, выраженный в сантиметрах [Zotov et al., 2015]. За исключением одной статьи, посвященной общему описанию рассматриваемой проблемы [Булычев и др., 2012] и работы авторов [Zotov et al., 2015], отечественных работ, связанных с использованием этих технологий для оценки составляющих водного баланса речных бассейнов, нет.

Цель исследования – оценка возможности использовать данные GRACE для оценки составляющих водного баланса крупных речных водосборов России и их изменений.

Результаты исследований и их обсуждение. Обработанная нами гравиметрическая информация представлена в виде осредненных данных об эквивалентном уровне воды для крупнейших речных бассейнов России (рис. 1). Можно проследить сезонный и многолетний ход запасов влаги в бассейнах рек, выделить экстремальные гидрологические ситуации (например, значительное снегонакопление весной 2013 г. на европейской территории России (ЕТР), маловодье 2010 и 2014 гг. в бассейне Волги и др.; наводнение на Амуре и предшествующие ему высокие запасы воды после весеннего половодья). Кроме того, можно определить аномалии влагозапасов по отношению к заданно-

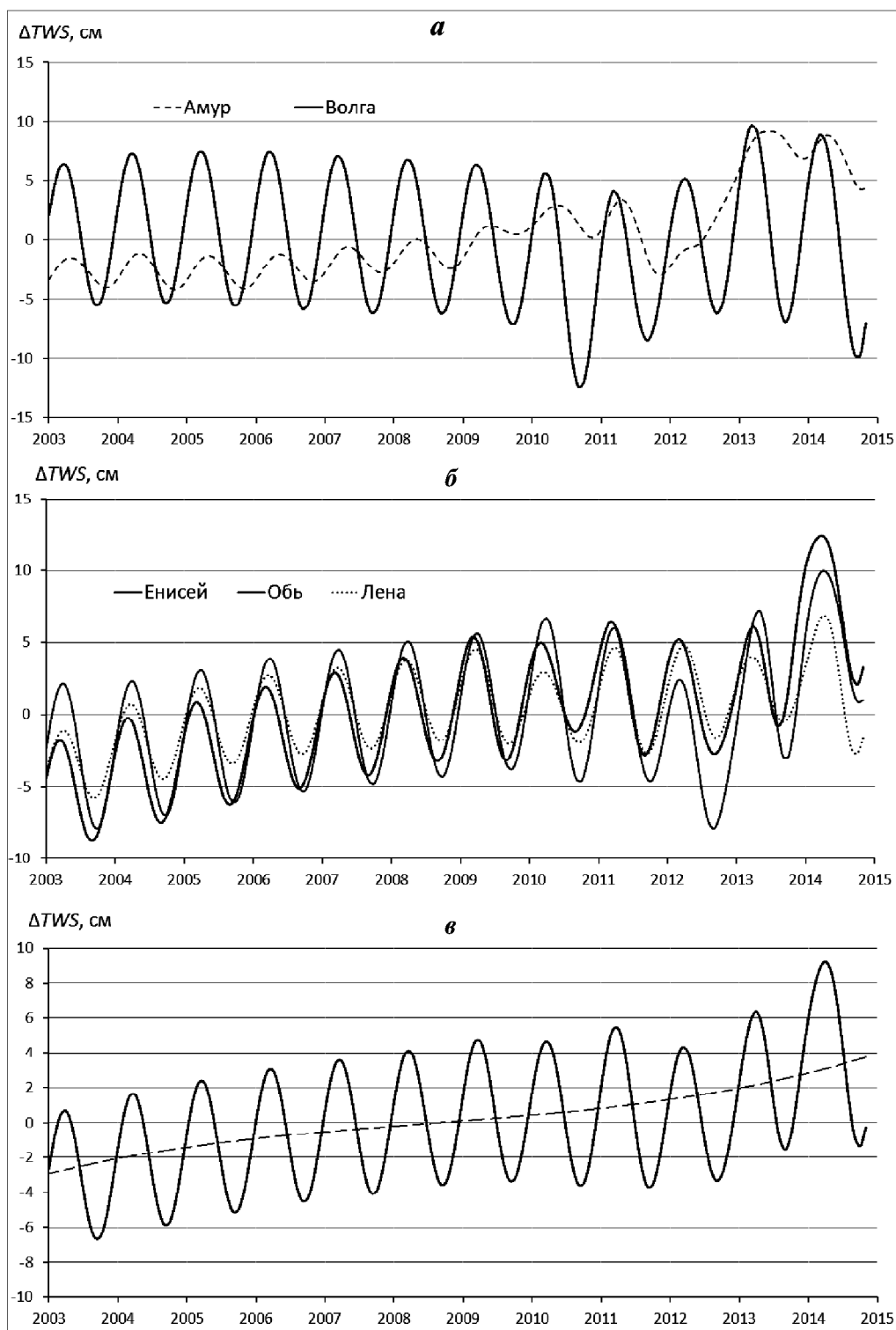


Рис. 1. Осредненные гравиметрические данные эквивалентной толщины водного слоя (аномалии общего влагозапаса ΔTWS по данным GRACE) для бассейнов крупнейших рек России: *a* – Амур и Волга; *б* – Енисей, Обь и Лена; *в* – аномалии суммарных влагозапасов крупнейших рек России (пунктиром показана линия тренда в виде полинома 3-й степени)

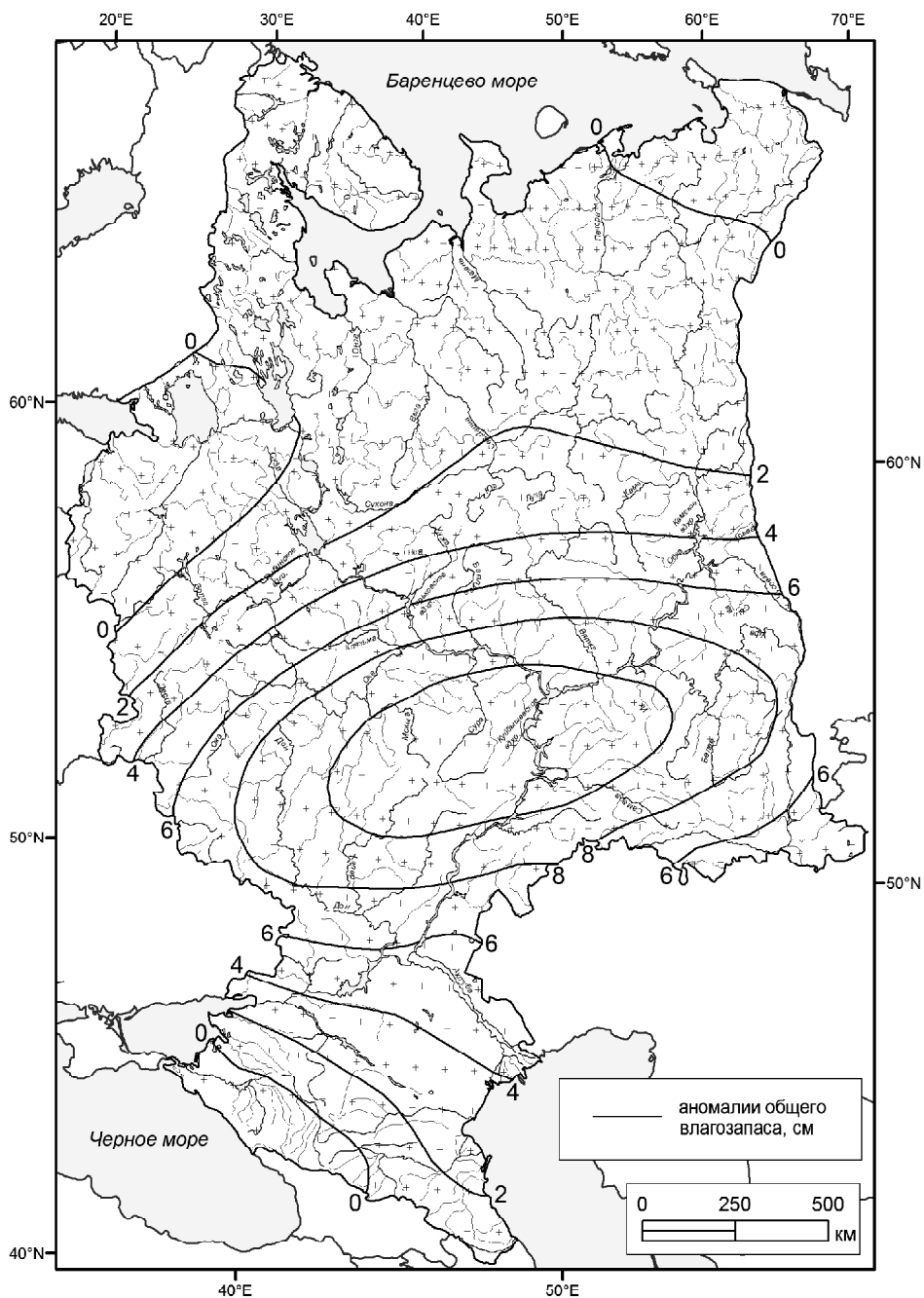


Рис. 2. Карта аномалий влагозапасов в речных бассейнах на европейской территории России в 2010 г. по данным GRACE (по отношению к среднему значению за 2003–2009 гг.), крестиками показаны узлы сетки, для которых есть данные GRACE

му среднему (рис. 2). Полученные данные хорошо согласуются с полями аномалий сезонной и месячной температуры приземного воздуха на территории ЕТР летом 2010 г. и данными о стоке рек. Реки ЕТР и Сибири различаются по амплитуде сезонных колебаний и направленности трендов общих влагозапасов. Если для европейских рек характерны в целом убывающие тренды, то для сибирских рек – положительные. Сибирские реки определяют общие тренды массонакопления влаги на всей территории России. Для получения полной анома-

лии запаса влаги среднее изменение слоя надо умножить на площадь бассейна.

Точная физическая интерпретация полученных сигналов со спутников требует сравнения с гидрологическими моделями (например, GLDAS или WGHM) и наземными наблюдениями. В качестве источника данных об осадках, испарении и стоке взяты данные GLDAS (Global Land Data Assimilation System) версии 2.0 с сайта URL: <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/>. Они содержат информацию за каждый месяц с 1948 г. по текущее время в узлах географической сет-

ки $0,25 \times 0,25^\circ$. В целом процедура обработки данных GLDAS-2 не отличается от GRACE, за исключением того, что данные об осадках получали для узлов сетки как сумму твердых и жидких осадков, о стоке – как сумму поверхностного и подповерхностного стока. Данные предшествующих исследователей [Frappart et al., 2006; Niu, Yand, 2006; Syed Tajdarul, Famiglietti, 2008], а также сделанные нами оценки изменений запасов воды по методу GRACE показали их хорошую согласованность с гидрологическими моделями поверхности суши (рис. 3).

Месячные изменения запасов воды на суше, полученные с помощью GRACE, позволяют рассчитывать важнейшие потоки влаги, включая суммарное испарение (эвапотранспирацию), сток, осадки минус испарение ($P-E$), изменение запасов подземных вод, а также, что наиболее важно, невязку водного баланса в разном масштабе.

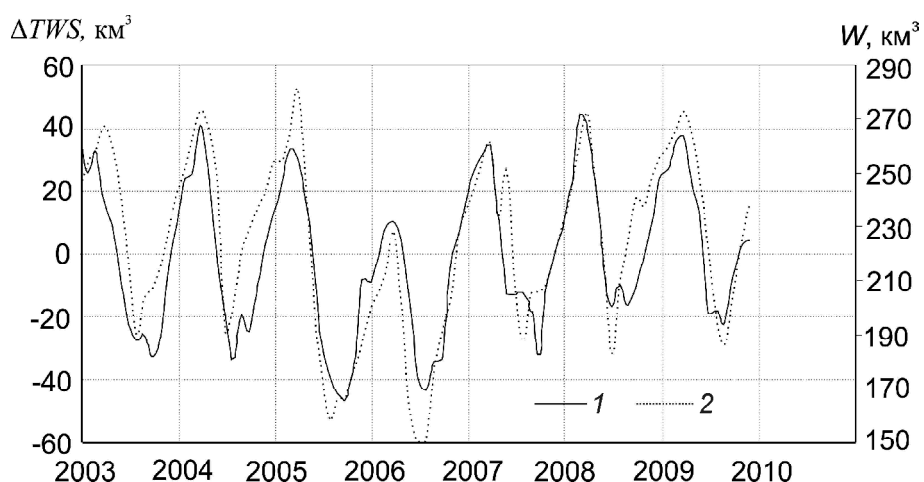


Рис. 3. Данные GRACE (1) и суммарные значения влагозапаса для бассейна Северной Двины, полученные с помощью модели GLDAS-2 (2) за 2003–2010 гг.

В качестве примера приведены графики связи влагозапаса ΔTWS и стока р. Мезень за июль и сентябрь 2003–2009 гг. (рис. 4).

В зимний период на изменение величины ΔTWS будет влиять изменение запаса воды в снежном покрове (ΔS) и изменение русловых запасов (ΔR),

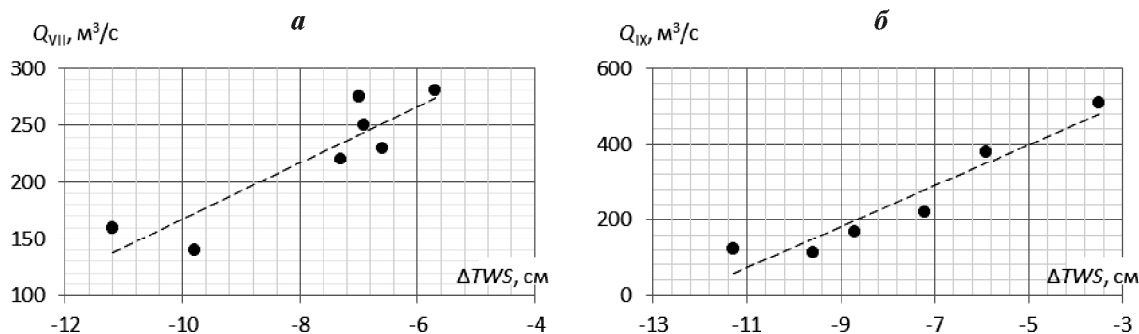


Рис. 4. Связь среднемесячных значений аномалий влагозапаса по данным GRACE (ΔTWS , см) и стока (Q , м³/с) для р. Мезень, пост д. Малонисогорская: а – за июль, б – за октябрь 2003–2009 гг.

Уравнение изменения массы для речного бассейна можно записать в следующем виде:

$$\Delta TWS = \Delta SW + \Delta(P-E) + \Delta S + \Delta TSS - \Delta R,$$

где ΔTWS – данные, наблюдаемые с помощью GRACE; ΔSW – суммарное содержание воды в озерах, болотах; $\Delta(P-E)$ – осадки минус испарение; ΔS – содержание воды в снежном покрове; ΔTSS – суммарное содержание влаги в почве; ΔR – суммарный сток с водосбора.

В отдельные периоды года роль некоторых составляющих водного баланса может быть незначительной или равной нулю, тогда изменение влагозапасов по GRACE можно объяснить только запасами в русловой сети и соответственно величиной ΔR .

оцениваемое с помощью измеренной на постах величины стока рек. С сайта meteo.ru мы взяли материалы по режимным снегомерным съемкам на 229 пунктах на ЕТР. Чтобы определить тесноту связи ΔTWS и ΔS , данные GRACE из узлов градусной сетки были проинтерполированы по четырем ближайшим точкам в места проведения снегомерных съемок. Затем для пунктов проведения снегомерных съемок на территории ЕТР за ноябрь–апрель получены совместные ряды ΔTWS (для всех трех научных центров) и запаса воды в снежном покрове (ΔS). Данные всех центров дают схожие результаты. Значения коэффициента корреляции между ΔTWS и S уменьшаются с 0,8 для северо-востока до 0,4–0,5 для юга ЕТР. Высокие значения коэффициента корреляции для северо-востока ЕТР объясняются устойчивой зимой с наибольшей для ЕТР средней мощностью снежного покрова (рис. 5).

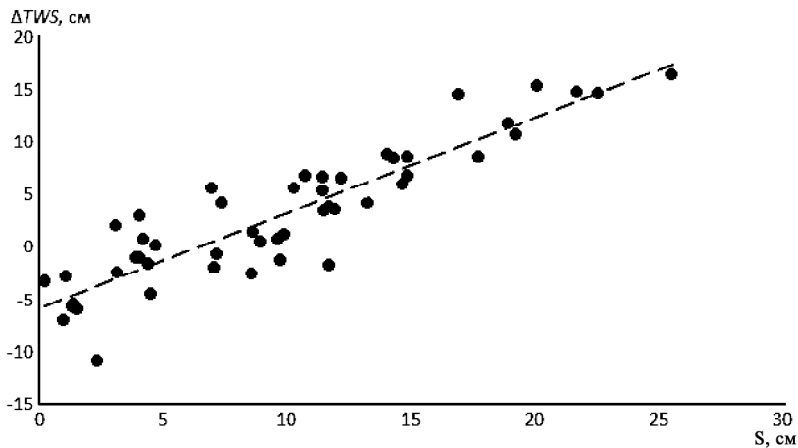


Рис. 5. График связи месячных значений запаса воды в снежном покрове (S) и аномалий влагозапаса по GRACE (ΔTWS , см) на станции на северо-востоке европейской части России за 2003–2010 гг.)

Во всех случаях на величину коэффициента корреляции помимо ошибок измерения S и ΔTWS влияют и другие причины. Зимой на вариациях TWS сказывается не только изменение влагозапаса в снежном покрове, но и величина речного стока с рассматриваемой территории. Для 6 речных бассейнов (таблица) это было учтено по формуле,

$$\Delta S_i = \Delta S_{i-1} + (\Delta TWS_i - \Delta TWS_{i-1}) + (\Delta R_i + \Delta R_{i-1}) / 2,$$

где ΔS_i , ΔS_{i-1} – запас воды в снежном покрове за текущий и предыдущий месяц; ΔTWS_i , ΔTWS_{i-1} – данные, наблюдаемые с помощью GRACE за те-

кущий и предыдущий месяц соответственно; ΔR_i , ΔR_{i-1} – суммарный сток с водосбора за текущий и предыдущий месяц соответственно.

Эта формула не учитывает возможность водоотдачи воды из снега в течение зимы. Таким образом, она должна показывать систематически завышенный результат (рис. 6). Кроме того, не учитывалось предзимнее увлажнение территории. Однако попытка учесть этот фактор, вычтя из значений TWS за ноябрь–апрель значение TWS в октябре (как характеристику предзимнего увлажнения), так же, как и учет стока рек, не привели к существенному увеличению значения коэффициента корреляции (таблица).

Выводы:

– для больших по площади территорий спутниковая гравиметрия представляет важный источник получения разнообразной геофизической информации, в том числе гидрологической. Расчеты показывают, что выбор центра обработки данных существенной роли не играет;

– данные GRACE могут быть использованы для оценки изменения водных ресурсов крупных речных бассейнов и территорий под влиянием климатических и антропогенных факторов. Дистанционная информация хорошо согласуется с данными гидрологических моделей и натурными из-

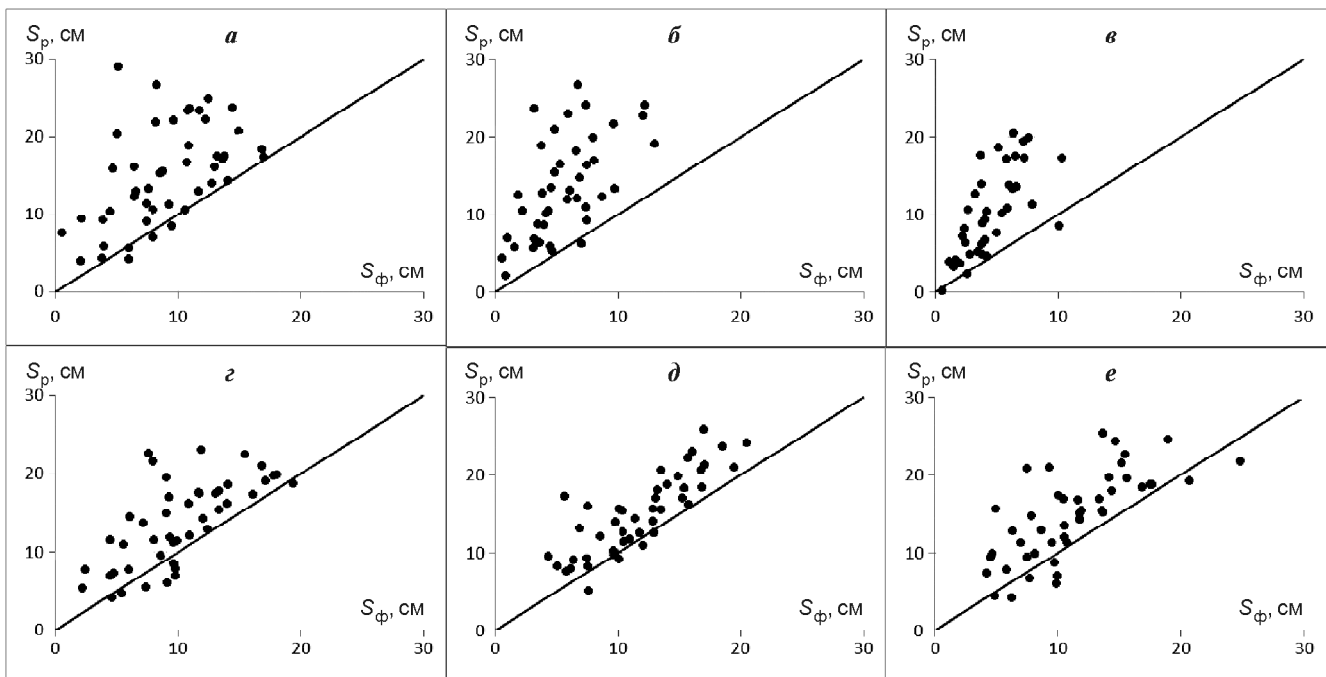


Рис. 6. Связь рассчитанных (S_p) и фактических ($S_ф$) значений запаса воды в снежном покрове (см): а – р. Вятка, пост г. Вятские Поляны; б – р. Ока, пост г. Муром; в – р. Дон, пост ст. Раздорская; г – р. Северная Двина, пост с. Абрамково; д – р. Печора, пост с. Оксино; е – р. Мезень, пост д. Малонисогорская (прямая – линия равных значений между наблюдаемыми и рассчитанными значениями S)

мерениями величины речного стока для отдельных периодов времени;

– получены высокие значения коэффициента корреляции месячных величин аномалий влагозапаса по GRACE и запаса воды в снежном покрове как для крупных речных бассейнов на севере

ЕТР, так и для отдельных пунктов снегомерных съемок. Дистанционные данные можно использовать для определения характеристик снежного покрова в труднодоступных арктических районах, а также для прогноза объема стока весеннего половодья.

Значения коэффициента корреляции между фактическими и рассчитанными значениями S

Река, пост	р. Вятка, г. Вятские Поляны	р. Ока, г. Горбатов	р. Дон, ст. Раздорская	р. Северная Двина, с. Абрамково	р. Печора, с. Оксино	р. Мезень, д. Малонисогорская
Без учета величины стока рек	0,65	0,56	0,57	0,80	0,86	0,86
С учетом данных о речном стоке	0,52	0,59	0,69	0,69	0,83	0,71

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

Булычев А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Применение данных спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для изучения и оценки гидролого-гидрогеологических характеристик крупных речных бассейнов // Водн. ресурсы. 2012. № 5. С. 476–484.

Bulychjov A.A., Dzhamalov R.G., Sidorov R.V. Primenenie dannyh sputnikovoj sistemy izmerenija polja gravitacii Zemli (GRACE) dlja izuchenija i ocenki gidrologo-gidrogeologicheskikh harakteristik krupnyh rechnyh bassejnov [Use of Data of Satellite System for Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) for Studying and Assessment of Hydrological–Geohydrological Characteristics of Large River Basins], Vodn. Resursy, 2012, no 5, pp. 476–484 (in Russian).

Зотов Л., Носова С., Баринов М. Многоканальный сингулярный спектральный анализ данных по гравитационному полю со спутников GRACE // Тр. 37-го Международ. семинара имени Успенского. М., ИФЗ РАН, 2010. С. 25–29.

Zotov L., Nosova S., Barinov M. Mnogokanal'nyj singuljarnyj spektral'nyj analiz dannyh po gravitacionnomu polju so sputnikov GRACE [Multivariate singular spectrum analysis method of gravity data from GRACE satellite measurements], Trudy 37-go mezhdunarodnogo seminar im Uspenskogo, M., IFZ RAN, 2010, pp. 25–29 (in Russian).

Chambers D.P. Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111, no 3. P. C03010. doi: 10.1029/2005JC002914.

Frappart F., Do Minh K., L'Hermitte. et al. Water volume change in the lower Mekong basin from satellite altimetry and imagery data // Geophys. J. Intern. 2006. Vol. 167, no 2, pp. 570–584. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03184.x.

Frappart F., Ramillien G., Famiglietti J.S. Water balance of the Arctic drainage system using GRACE gravimetry products // Intern. J. Remote Sensing. 2011. Vol. 32, no 2, pp. 431–453. doi:10.1080/01431160903474954.

Niu G.-Y., Yang Z.-L. Assessing a land surface model's improvements with GRACE estimates // J. Geophys. Res. Lett. 2006. 33. Vol. 33, no 7. L07401. doi:10.1029/2005GL025555.

Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J.S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India // Nature. 2009. Vol. 460, no 7258, pp. 999–1002.

Schmidt R., Flechtner F., Meyer U. Hydrological signals observed by the GRACE satellites // Surv. in Geophys. 2008. Vol. 29. no 4, 5, pp. 319–334.

Swenson S., Wahr J. Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravity measurements // J. Hydrometeorology. 2006. Vol. 7, no 2. P. 252–270. doi:10.1175/JHM478.1.

Swenson S., Wahr J. Methods for inferring regional surface-mass anomalies from GRACE measurements of time variable gravity // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. P. 21–93. doi:10.1029/2001JB000576.

Syed Tajdarul H., Famiglietti J.S., Rodell M. et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS // Water Res. Res. 2008. Vol. 44. P. 1–15.

Syed Tajdarul H., Famiglietti J.S. GRACE-Based estimates of terrestrial freshwater discharge from basin to continental Scales // J. Hydrometeorology. 2009. Vol. 10, no 1. P. 22–40.

Tikhonov A.N., Leonov A.S., Yagola A.G. Nonlinear ill-Posed Problems. N.Y.; London: Chapman and Hall, 1998.

Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time-variability of the Earth's gravity field: Hydro-logical and oceanic effects and their possible detection using GRACE // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 32205–30229.

Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE // Planetary exploration and science: Recent Results and Advances. Berlin: Springer Geophys., 2015. P. 45–59.

Поступила в редакцию
13.04.2015

L.V. Zotov, N.L. Frolova, V.Yu. Grigoriev, M.A. Kharlamov

**APPLICATION OF THE SATELLITE SYSTEM OF THE EARTH'S GRAVITY FIELD
MEASUREMENT (GRACE) FOR THE EVALUATION OF WATER BALANCE
IN RIVER CATCHMENTS**

Possible application of the satellite gravity survey data obtained under the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) for solving various hydrological problems is discussed. Former investigations linked the monthly changes of the terrestrial gravity field of the Earth to the movement of water masses within the continental part of the hydrological cycle. The GRACE technology allows obtaining the realistic mean data on the changes of land water resources on continental and regional scale. The technique could be useful for the monitoring of river discharge, snow cover, glacier melting and groundwater level oscillations over vast territories. The specific features of the technique itself and the data processing are described. The GRACE-based monthly gravity field data are transformed into the maps of water level equivalent and averaged for the catchments of the largest rivers of Russia. The temporal variability of the parameter is analyzed. Possible application of the GRACE data for the evaluation of particular components of water balance within the largest river basins of the European part of Russia is discussed.

Keywords: monitoring, satellite gravity survey, GRACE, water resources.