

Современные возможности использования спутниковой системы GRACE для решения гидрологических задач*

Н. Л. Фролова¹, В. Ю. Григорьев^{1,2}, И. Н. Крыленко^{1,2}, Е. А. Захарова²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

² Институт водных проблем Российской академии наук,
Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

Для цитирования: Фролова, Н. Л., Григорьев, В. Ю., Крыленко, И. Н., Захарова, Е. А. (2021). Современные возможности использования спутниковой системы GRACE для решения гидрологических задач. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (1), 107–122. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.107>

В работе изложены основные результаты использования миссии GRACE при оценке отдельных составляющих бассейновых влагозапасов, расчете составляющих водного баланса и гидрологическом моделировании. Оценка ошибки данных GRACE составляет порядка 11 мм для водосборов площадью 100 тыс. км² и уменьшается по мере роста площади усреднения, что позволяет фиксировать многолетнюю и сезонную изменчивость влагозапасов. Показано, что уменьшение влагозапасов в бассейне р. Дон за 2002–2019 гг. в приблизительно равной степени связано как с почвенной влагой, так и подземными водами. При этом минимум запасов подземных вод был достигнут уже в 2010 г., а почвенных — к 2015 г. Начиная с 2016 г., запасы подземных вод в бассейне Дона в течение зимнего периода практически не изменяются, что связано, вероятно, с большим количеством оттепелей и меньшей глубиной слоя промерзания в этот период. По данным метеостанций для осадков холодного периода европейской части России (ЕЧР) была получена величина их систематической ошибки — 20–25 %. Сравнение величин влагозапасов для рек севера ЕЧР по GRACE и модели ECOMAG показало их хорошую согласованность ($NSE = 0.78 \div 0.89$). При этом, в сравнении с GRACE, ECOMAG демонстрирует меньший рост влагозапасов в зимний период и более быструю их сработку в период половодья. В настоящие время прогресс в применении данных GRACE в гидрологии лимитируется их низким пространственно-временным разрешением, которое, в рамках самой миссии GRACE, в ближайшие годы улучшено не будет. При этом сам принцип работы GRACE может в перспективе применяться к различным спутниковым группировкам.

Ключевые слова: мониторинг, космическая гравиметрия, водные ресурсы, гидрологические модели.

1. Введение и постановка проблемы

Необходимость обеспечить устойчивое развитие общества в условиях усиливающегося влияния человека на природу ставит перед гидрологами новые вызовы (Wilby, 2019). Для решения таких важных проблем, как получение необходимых

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60021-Арктика — расчет влагозапасов и моделирование для арктических бассейнов) и РНФ (проект № 21-47-00008 — методические вопросы, оценка точности данных GRACE).

данных для слабоизученных территорий, прогноз наводнений и маловодий, исследование физических причин засух, охватывающих большие территории, создание системы управления рисками опасных природных явлений в режиме реального времени, необходима информация о запасах воды в речном водосборе, их распределении и состоянии. Значительный прогресс в этом направлении в последние десятилетия связан с развитием реанализа метеорологических полей и спутниковой микроволновой съемки. Однако эти инструменты используют данные наземных наблюдений для калибровки, валидации и, в ряде случаев, коррекции рассчитанных величин влагозапасов.

Точность микроволновой съемки также сильно зависит от локальных условий (рельефа, лесистости, состояния подстилающей поверхности и др.). В целом она лучше воспроизводит состояние поверхности водосбора и первых сантиметров толщи почвогрунтов, чем более глубоких слоев.

В значительной степени от этих недостатков свободна спутниковая система GRACE, позволяющая изучать временные вариации гравитационного поля Земли, обусловленные процессами массопереноса в оболочках Земли, в том числе в гидросфере (Zotov et al., 2015b). Конечным продуктом миссии GRACE являются аномалии бассейновых влагозапасов (terrestrial water storage — TWS), представляющих собой запасы поверхностных и подземных вод во всех агрегатных состояниях (Zotov et al., 2015a). Работы с использованием GRACE в гидрологии ведутся по трем основным направлениям: 1) исследование изменения TWS и его отдельных составляющих под влиянием хозяйственной деятельности и климата; 2) расчет отдельных составляющих водного баланса (осадков, испарения и речного стока); 3) ассимиляция данных GRACE в гидрологические модели, их использование при калибровке и валидации моделей.

Целью работы является обобщение основных результатов, полученных в рамках трех вышеуказанных направлений, как авторами статьи, так и другими исследователями, а также разработка рекомендаций по использованию данных GRACE и оценка перспектив их использования.

2. Миссия GRACE

Миссия GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) начала свою работу с запуска двух спутников-близнецов в марте 2002 г. Они полностью прекратили свое функционирование в сентябре 2017 г. (а, начиная с 2011 г., в их работе были перерывы), однако в мае 2018 г. были запущены спутники GRACE-FO. Спутники GRACE-FO практически аналогичны спутникам GRACE (принцип работы, параметры орбиты), за исключением наличия более точного дальномера и GPS-антенны для измерения профилей температуры и влажности в атмосфере (gracefo.jpl.nasa.gov, n. d.).

Принцип работы миссии GRACE основан на фундаментальных законах релятивистской механики. Основой миссии GRACE являются два спутника, для которых рассчитывается изменение их координат. Непосредственно измерения приборов составляют нулевой уровень обработки (L-0). Далее происходит перевод измерений приборов в физические величины с учетом калибровочных коэффициентов приборов, включая проверку качества данных (L-1A). Полностью подготовленные

для расчета аномалий гравитационного поля данные представляют собой L-1B уровень обработки. Затем, используя алгоритм решения обратной задачи с регуляризацией, получают аномалию гравитационного поля Земли. Для выделения составляющей, связанной с перераспределением водных масс на суше (L-2), из аномалий гравитационного поля вычитают прочие компоненты, рассчитываемые на основе ряда геофизических моделей. Конечный продукт, получаемый после применения различных фильтров для минимизации шумов в L-2, представляет собой средне-месячные/среднедекадные величины TWS в узлах градусной сетки (gfz-potsdam.de, n. d.; Dahle et al., 2019; Chen, 2019).

Отметим, что непосредственно по данным измерений спутников GRACE рассчитываются аномалии гравитационного поля Земли, но не вертикальное (вдоль нормали к поверхности) распределение масс, определяющих величину этих аномалий. Поэтому GRACE фиксирует изменение влаги вне зависимости от того, на какой глубине/высоте это изменение произошло. Вместе с тем количество влаги в глубоких водоносных горизонтах, не дренируемых речной сетью, на временных промежутках в десятки и сотни лет, как правило, практически не изменяется и поэтому не фиксируется в данных GRACE.

По мере совершенствования методов обработки данных измерений, расчета и развития геофизических моделей появлялись новые версии данных GRACE, последняя из которых, шестая (RL-06), была выпущена в декабре 2018 г. Каждая новая версия данных GRACE имеет меньшую ошибку, чем предыдущая. Так, для данных, предоставляемых GFZ, уменьшение ошибок от версии к версии следующее: 14 % от RL-01 к RL02, 24 % от RL02 к RL03, 4 % от RL03 к RL04, 0 % от RL04 к RL05a (начиная с RL05a, в TWS не включают атмосферную влагу), 41 % от RL05a к RL06 (Dahle et al., 2019).

Для перехода от данных L-1B к L-2 существуют два основных подхода: представление аномалий TWS в виде суммы сферических гармоник (SH — spherical harmonic) или масконов (MC — mascon). В целом MC является несколько более точным (но не всегда и везде) и, кроме того, не требует, как SH , применения множества фильтров, что упрощает использование и интерпретацию данных о TWS (Wang et al., 2020).

Девять архивов данных GRACE (Grigoriev, 2018) в версии RL-05 были использованы для оценки межархивного разброса значений TWS на основе расчета величины среднеквадратического отклонения ($\sigma_{apx.TWS}$) за каждый месяц по отдельным центрам для всего ряда и его отдельных частей для 27 речных бассейнов на территории РФ. Величина $\sigma_{apx.TWS}$ не зависит от TWS и меняется от 0.9 см в бассейне р. Лены до 4 см в бассейне р. Пенжины (Grigoriev, 2018).

Величина $\sigma_{apx.TWS}$ тесно связана с площадью водосбора (F , тыс. км²), для которого производился расчет. При аппроксимации зависимости $\sigma_{apx.TWS} = f(F)$ логарифмической функцией мы получаем коэффициент детерминации, равный 0.86, и уравнение связи

$$\sigma_{apx.TWS} = 5.99 - 0.64 \ln(F). \quad (1)$$

В диапазоне площадей до 100 тыс. км² величина $\sigma_{apx.TWS}$ практически не зависит от F , что связано с потерей высокочастотной составляющей вариации TWS при фильтрации. Уменьшение $\sigma_{apx.TWS}$ с ростом F объясняется тем, что различие

в обработке исходных данных сказывается, главным образом, на мелкомасштабной изменчивости поля TWS (Ferreira et al., 2016).

Первые оценки точности данных GRACE появились еще до начала работы миссии. Планировалось, что GRACE будет предоставлять данные каждые 2–4 недели с точностью порядка 2 мм на суше и 1 мм для океана для площадей порядка 100 тыс. км² (Wahr et al., 1998). Данные, полученные в первые месяцы работы миссии GRACE, показали существенно меньшую точность — порядка 21 мм при радиусе усреднения TWS в 750 км (Wahr et al., 2004). Текущие оценки точности данных GRACE (для RL-05) имеют большой разброс в зависимости от используемой методики. Оценки, полученные методом «треуголки» (three-cornered hat method), для водосборов с площадью порядка 100 тыс. км² показывают ошибку от 7 мм (Ferreira et al., 2016) до 25–50 мм (Long et al., 2017), что, видимо, указывает на ненормальность распределения ошибок в рядах TWS , не позволяющей использовать метод «треуголки» для их оценки. Иные методы дают оценку в 17–18 мм (Vishwakarma et al., 2018).

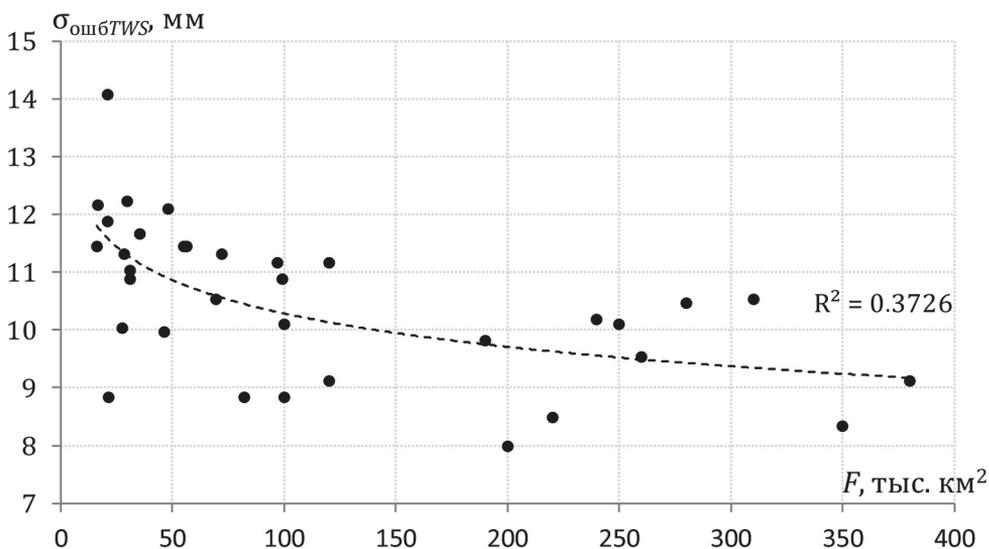


Рис. 1. Ошибка определения TWS за холодный период при различной площади водосбора (по данным GRACE для рек ЕЧР)

Для ряда водосборов европейской части России (ЕЧР) величина ошибки TWS (ее среднеквадратического отклонения) была рассчитана на основе уравнения водного баланса за холодный период (Grigoriev, 2018) по данным о слое речного стока, осадков и испарения. Для водосборов с площадью порядка 100 тыс. км² ошибка составила порядка 10.5 мм (рис. 1), что, с учетом предположения о равенстве нулю ошибки определения слоя стока и слоя испарения, можно считать верхней оценкой. При этом необходимо учитывать, что ошибка TWS может зависеть от сезона, так как GRACE может не улавливать изменения, происходящие достаточно быстро (к примеру, изменение влагозапасов в период половодья). Также, что особенно важно для средних водосборов, ошибка TWS зависит от того, насколько синхронно

меняются влагозапасы на водосборе и прилегающей территории, так как сигнал с малого водосбора зашумлен сигналом с прилегающей территории. Соответственно, ошибка TWS зависит не только от площади водосбора, для которого производится расчет TWS , но и от сезона и положения водосбора.

3. Использование GRACE для решения гидрологических задач

3.1. Изменение бассейновых влагозапасов и факторы, обуславливающие их на территории России и в мире

Поскольку данные GRACE описывают изменение TWS с месячным разрешением, их применение ограничено исследованием многолетней и сезонной изменчивости. При этом более кратковременные изменения (изменения влажности почвы в результате выпадения осадков, изменение запаса воды в снежном покрове в период оттепели и др.) не всегда фиксируются.

Одними из наиболее востребованных объектов исследования для миссии GRACE являются ледники. За последние 20 лет точность альтернативного метода — спутниковой альтиметрии — значительно возросла и уже позволяет определять изменение высоты ледников с точностью до нескольких миллиметров, но при этом она не избавилась от своих фундаментальных недостатков — зависимости результатов измерений от свойств подстилающей поверхности, состава льда и фирна.

GRACE показала уменьшение массы ледников Гренландии и Антарктиды, а также позволила выявить районы, где скорость этого уменьшения максимальна — южную и западную части Гренландии, район моря Амундсена в Антарктиде. Привлечение данных альтиметрии и моделирования позволило прийти к выводу, что уменьшение массы Гренландского ледника на 40 % связано с увеличением массы и количества отколовшихся льдин, а на 60 % — с таянием льда (Rignot et al., 2011; Sasgen et al., 2012). При этом на фоне роста температуры океана существенную роль в изменениях баланса ледников сыграла крупномасштабная циркуляция атмосферы (Mémin et al., 2015).

GRACE впервые позволила проследить изменение влагозапасов речных бассейнов на региональном и глобальном уровнях, а также выявить основные факторы, его определяющие. В изменении TWS в тропических и холодных регионах преобладает сезонная изменчивость, обусловленная динамикой выпадения осадков (Scanlon et al., 2018). Направленные изменения характерны для районов многолетних засух (Калифорния) или районов откачки подземных вод на нужды сельского хозяйства (северо-восток Китая, северо-запад Индии, юг Саудовской Аравии). Значимая многолетняя изменчивость TWS для южного полушария во многом объясняется влиянием Эль-Ниньо (Humphrey et al., 2015b; Rodell et al., 2018).

Данные миссии GRACE, ассимилированные вместе с другими данными дистанционного зондирования в гидрологические модели, также используются для расчета запасов почвенных и подземных вод и различных индексов, характеризующих опасность развития засух или наводнений (nasagrace.unl.edu, n. d.; globalfloods.eu, 2020).

Базовый анализ увлажненности речного водосбора возможно провести на основе данных GRACE, глобальных гидрологических моделей и спутниковой

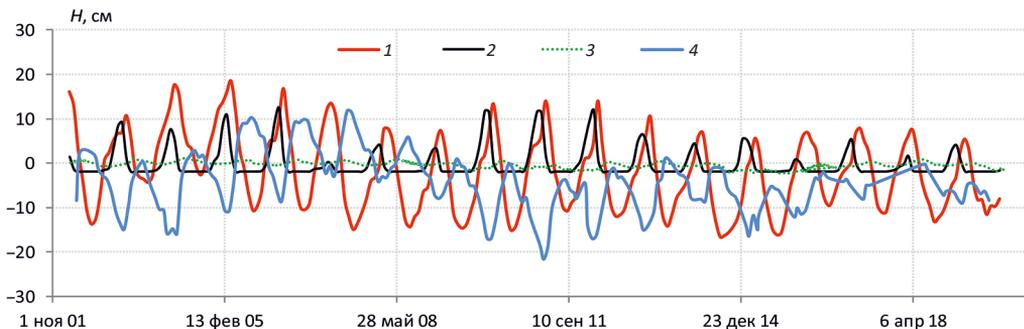


Рис. 2. Составляющие влагозапасов в бассейне р. Дон как отношение эквивалентного слоя воды (H , см) к средним значениям за 2004–2009 гг.: 1 — почва и растительность; 2 — снежный покров; 3 — запас воды в Цимлянском водохранилище; 4 — запас подземных вод

альтиметрии. В частности, нами за 2002–2019 гг. в бассейне р. Дон была произведена декомпозиция TWS на запас влаги в верхнем 2-метровом слое почвы, на перехваченную растительностью влагу, запас воды в снеге (по данным модели GLDAS Noah 2.1 (Giovanni)), запас воды в Цимлянском водохранилище (по данным ряда альтиметрических спутников (ipad.fas.usda.gov, 2020)) и на запас подземных вод как разницу между TWS по GRACE (RL-06 MC JPL) и вышеуказанными составляющими TWS (рис. 2).

Для р. Дон (ст. Раздорская) период 2007–2016 гг. отличается минимальными годовыми расходами воды, начиная, по крайней мере, с 1945 г. Это связано главным образом с повышенными величинами испарения за рассматриваемый период, так как величина осадков за 2007–2016 гг. была близка к медиане за 1945–2016 гг. Из рис. 2 видно, что в целом, несмотря на заметное потепление в бассейне р. Дон в последние десятилетия, основная фаза сработки запасов подземных вод по-прежнему приходится на зиму, в то время как с конца зимы (февраль–март) до середины-конца лета происходит их пополнение. Однако с 2016 г. картина меняется — сезонный ход начинает сглаживаться. Формирование стока в период половодья в 2016–2019 гг. было связано с почти полным отсутствием слоя сезонного промерзания. В результате происходит существенное пополнение подземных вод и их более раннее поступление в реки.

Для запасов почвенной влаги характерно уменьшение годовых максимумов (вслед за уменьшением запасов воды в снеге) и относительное постоянство годовых минимумов. Минимум запасов подземных вод во время маловодья 2007–2016 гг. был достигнут уже в начале 2011 г., а к 2012 г. он вернулся к среднемноголетнему значению, в то время как запасы воды в почве только в 2014–2015 гг. достигли своего минимума.

Косвенно, данные GRACE возможно использовать для расчета величины TWS и за период, предшествующий началу работы миссии. Как было показано в (Grigoriev and Frolova, 2018), между расходами воды и бассейновыми влагозапасами за период летней межени существует тесная связь. Так, при росте величины влагозапасов на 1 мм, среднемесячные расходы воды в створе х. Беляевский увеличиваются на $2.28 \text{ м}^3/\text{с}$. Коэффициент детерминации для этой зависимости составляет 88.6%. На основании этой зависимости, а также расходов воды за июль — август

в створе х. Беляевский (за 1944–1951 гг. расходы воды были восстановлены по данным створа г. Калач), были рассчитаны аномалии TWS на 1 января 1978 и 2007 гг. относительно 1 января 1945 г. Полученные для части бассейна выше створа х. Беляевский величины TWS были распространены для части бассейна выше створа ст. Раздорская. Величина TWS на 1 января 2017 г. вычислялась относительно величины TWS на 1 января 1945 г. по данным GRACE и рассчитанной величины TWS за 2007 г. Полученные величины TWS представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рассчитанные величины влагозапасов для бассейна р. Дон выше створа ст. Раздорская на 1 января, в мм

| Год | 1945 | 1978 | 2007 | 2017 |
|------------|------|------|------|------|
| TWS , мм | 0 | 88 | 145 | 64 |

3.2. Расчет отдельных составляющих водного баланса с помощью данных GRACE

Для определения неизвестных членов используется уравнение водного баланса, несмотря на относительно небольшую точность таких расчетов по сравнению с измерениями или результатами моделирования. Преимущество такого подхода — возможность проведения оценки для больших относительно малоизученных или труднодоступных территорий (Lorenz et al., 2014; Seo and Lee, 2017).

Однако в целом это направление не получило развития, на что имеется несколько причин. GRACE удовлетворительно описывает изменение TWS лишь в бассейнах больших рек, на которых, как правило, проводятся регулярные гидрометрические наблюдения. Грубое временное разрешение данных не позволяет получать сведения о наиболее значимых характеристиках водного режима, а необходимость привлекать данные по испарению и осадкам не дает возможности использовать рассчитанные величины расходов воды для калибровки или валидации климатических моделей. Расчет величины испарения по уравнению водного баланса с помощью GRACE, как правило, не оправдан в силу большей точности реанализа метеорологических полей и LSM (land surface model) (Xu et al., 2019).

Не найдя широкого применения при расчете элементов водного баланса, определение которых вызывает наибольшие сложности, данные GRACE, не имеющие систематической ошибки, позволили оценить систематическую ошибку осадков холодного периода как на глобальном уровне, так и для отдельных территорий (Swenson, 2010; Behrangi et al., 2017).

Мы оценили систематическую ошибку зимних осадков, измеренных с помощью осадкомера Третьякова, а также с помощью откорректированных и неоткорректированных данных по методике Главной геофизической обсерватории (Bogdanova et al., 2007), полученной на основе работ, проводившихся на Валдайском осадкомерном полигоне Государственного гидрологического института. Для расчета смещенности зимних осадков мы воспользовались уравнением водного баланса, допуская, что осадки являются единственным элементом водного баланса, имеющим смещенную оценку (Grigoriev, 2018).

Для исправленных и неисправленных сумм осадков за холодный период были рассчитаны величины систематической ошибки (*bias*, мм), относительной систематической ошибки (отношение *bias* к среднему слою измеренных осадков — *bias*, %) и ошибка выборочного среднего *bias* (σ_{bias} , мм). Результаты расчета для ряда водосборов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка систематической ошибки измеренных осадков холодного периода и ошибка определения ее выборочного среднего

| Река — пост | Неисправленные | | | Исправленные | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------|----------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| | <i>bias</i> , мм | <i>bias</i> , % | σ_{bias} , мм | <i>bias</i> , мм | <i>bias</i> , % | σ_{bias} , мм |
| р. Ока — г. Горбатов | 40.8 | 23.9 | 19.4 | 17.9 | 9.2 | 26.7 |
| р. Дон — ст. Раздорская | 31.1 | 21.5 | 12.7 | 11.4 | 7.0 | 18.3 |
| р. Печора — с. Оксино | 81.1 | 33.2 | 28.4 | 28.3 | 9.6 | 27.2 |
| р. Мезень — с. Малонисогорская | 60.8 | 28.5 | 22.7 | 28.3 | 11.5 | 25.8 |
| р. Сев. Двина — с. Усть-Пинега | 44.2 | 21.3 | 23.2 | 3.7 | 1.5 | 28.3 |
| р. Урал — г. Оренбург | 72.2 | 68.8 | 21.1 | 18.7 | 11.9 | 19.8 |
| р. Вятка — с. Вятские Поляны | 39.7 | 20.0 | 16.5 | 30.0 | 14.4 | 20.6 |
| р. Белая — г. Бирск | 64.0 | 36.4 | 15.8 | 41.7 | 21.0 | 20.2 |
| р. Кама — п. Гайны | 21.9 | 11.1 | 27.5 | -1.1 | -0.5 | 30.8 |

В среднем величина осадков холодного периода, рассчитанная по методу водного баланса, оказалась на 23 % больше, чем измеренная. Наибольшее расхождение характерно для бассейна р. Урал (выше створа г. Оренбург) — более 68 %. Вероятно, что столь неправдоподобная оценка *bias* для бассейна р. Урал связана с занижением слоя осадков при интерполяции ввиду малого количества станций на больших высотах и завышением величины изменения *TWS* за холодный период в результате случайных ошибок GRACE. Для бассейна р. Оки разница между рассчитанными и измеренными осадками составляет около 20 %, для бассейна р. Дон — 20–30 %, для бассейнов р. Печоры — 30 %, р. Северной Двины — 20 %. Для бассейна р. Камы характерны значения в 10–20 % за исключением бассейна р. Белой, где этот показатель достигает 30–35 %, что, вероятно, связано с ошибками при интерполяции. По абсолютной величине наибольшее количество неучтенных осадков наблюдается в бассейне р. Печоры в створе с. Оксино — 80 мм за холодный период (Grigoriev, 2018).

3.3. Использование GRACE при гидрологическом моделировании

При моделировании формирования речного стока появляется возможность рассматривать значения суммарных бассейновых влагозапасов как отдельный результат моделирования и сравнивать оценки *TWS*, полученные при моделировании, со спутниковыми данными, например для дополнительной верификации модели. Многими исследователями данные GRACE привлекаются не только для верификации модели, но и для калибровки модельных параметров.

Ассимиляция данных спутника основана на количественной оценке ошибок модели и данных наблюдений с последующей комбинацией результатов моделирования и данных измерений для уменьшения ошибки в определении модельных параметров. Среди методов ассимиляции можно выделить вариационные методы, аналогичные тем, которые используются при создании реанализов полей метеорологических характеристик, и методы статистического последовательного анализа, включая различные версии фильтров: калмановский, многочастичный, негауссовый фильтр гистограммы рангов (non-Gaussian rank histogram filter) (Khaki et al., 2017). Зачастую вместе с данными GRACE в модель ассимилируются и другие дистанционные данные — прежде всего данные по влажности почвы, запасе воды в снеге и величине испарения (Jiang and Wang, 2019). Ассимиляция данных GRACE в гидрологические модели, как правило, приводит к уменьшению ошибок расчета запасов подземных вод и почвенной влаги в слое мощностью от нескольких десятков сантиметров — на 15–30%. Соответственно, уменьшение ошибок заметно для составляющих *TWS*, для которых возможны направленные изменения в течение нескольких месяцев и более (Tangdamrongsub et al., 2017; Tian et al., 2017). Изменение точности воспроизведения речного стока и испарения при ассимиляции информации о *TWS* практически не происходит.

При калибровке гидрологической модели с помощью данных GRACE параметры подбираются так, чтобы модель наилучшим образом воспроизводила как расходы воды, так и бассейновые влагозапасы. При этом в зависимости от цели работы возможен подбор критериев качества, которые в большей степени были бы направлены на минимизацию ошибок воспроизведения влагозапасов или расходов воды. Как было продемонстрировано в ряде исследований, использование при калибровке параметров гидрологической модели данных о *TWS* совместно с данными о стоке не ухудшает качество моделирования речного стока и уменьшает ошибки при моделировании других компонентов водного баланса, включая запасы подземных и почвенных вод, запасы воды в снеге и испарение. Однако для настройки гидрологической модели одних данных GRACE недостаточно (Bai et al., 2018), так как использование данных *TWS* для калибровки модели без привлечения другой гидрологической информации дает результат, близкий к случайному выбору калибруемых параметров.

В нашей работе для четырех бассейнов северных рек (Онеги, Северной Двины, Мезени, Печоры) было проведено сравнение влагозапасов, рассчитанных с помощью модели формирования стока ECOMAG (Motovilov et al., 1998) с данными о *TWS* спутников GRACE. Первоначально для указанных бассейнов модель формирования стока была откалибрована и верифицирована на основе суточных данных о расходах воды за многолетний период с 1980 по 2014 г. (Motovilov and Gelfan, 2013; Krylenko et al., 2014, Golosnoy and Krylenko, 2017) и показала высокую эффективность при воспроизведении гидрографов стока в различных створах.

При моделировании формирования стока влагозапасы во всех рассматриваемых вертикальных уровнях по всем удельным водосборам (расчетным единицам в модели ECOMAG) суммировались за каждые сутки и в дальнейшем осреднялись с месячным шагом, соответствующем временному шагу данных GRACE. Далее аналогично с данными GRACE были рассчитаны аномалии влагозапасов относительно их средних значений за период 2004–2009 гг.

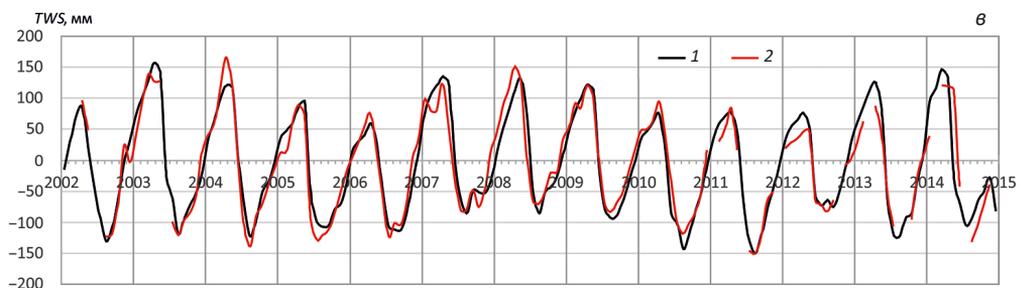
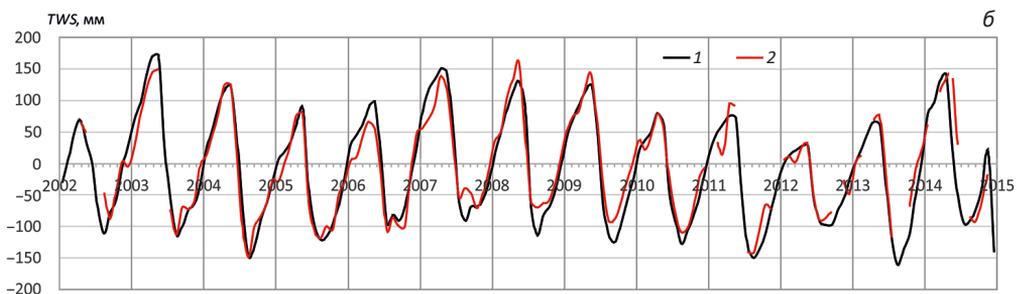
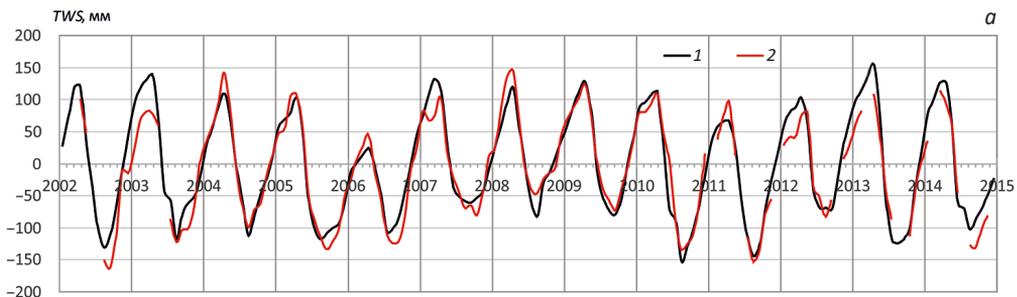


Рис. 3. Аномалии влагозапасов в бассейнах рр. Сев. Двины (а), Печоры (б), Мезени (в) по результатам моделирования на основе модели ECOMAG (1) и по данным спутников GRACE (2)

Сравнение показало, что смоделированные на основе ECOMAG и полученные на основе спутниковых измерений суммарные влагозапасы в исследуемых бассейнах за рассматриваемый период 2002–2014 гг. хорошо совпадают как по диапазону изменений, так и по сезонному ходу (рис. 3). Критерий соответствия Нэша — Сатклифа (NSE), рассчитанный по среднемесячным значениям влагозапасов, полученным на основе двух методов, для всех бассейнов, превысил 0.75 (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение результатов моделирования на основе ECOMAG и спутниковых данных по влагозапасам в бассейнах рек на основе критерия NSE

| Бассейн | р. Онега | р. Сев. Двина | р. Мезень | р. Печора |
|---|----------|---------------|-----------|-----------|
| Критерий соответствия Нэша — Сатклифа (NSE) | 0.78 | 0.85 | 0.83 | 0.89 |

Основной период увеличения влагозапасов в пределах бассейнов северных рек — период снегонакопления. В начале октября при неустойчивом снежном покрове наблюдаются наиболее высокие расхождения между оценками по модели и спутниковыми данными, в зимний период ECOMAG показывает несколько меньший рост влагозапасов в сравнении с GRACE. Максимальные значения влагозапасов как по результатам моделирования, так и по спутниковым данным наблюдаются в конце мая — июне после периода снеготаяния. В бассейне р. Печоры максимумы наблюдаются несколько позже, чем в остальных бассейнах. Это связано с более поздним началом снеготаяния, что и демонстрируют результаты моделирования. В летний период влагозапасы уменьшаются за счет испарения и сработки грунтовых горизонтов, при этом ECOMAG показывает более быстрое уменьшение влагозапасов после половодья по сравнению с данными GRACE.

Некоторые отличия в оценках влагозапасов могут быть связаны с возможными погрешностями в используемых при моделировании данных об осадках, особенно зимних, упомянутыми выше. Наибольшие расхождения между результатами моделирования и данными спутника наблюдаются в бассейне р. Онеги и могут быть связаны как с недостаточной освещенностью метеорологической информацией из-за меньших размеров водосбора, так и влиянием карста в бассейне реки.

Результаты сравнения оценок влагозапасов для речных бассейнов севера европейской территории России, полученные двумя независимыми методами (по результатам моделирования и по спутниковым данным), показывают, что в дальнейшем можно использовать модельные оценки влагозапасов для увеличения продолжительности рядов за предшествующий исторический период до 2000 г. Также в переходный период ввода в эксплуатацию новых гравиметрических спутников в 2017–2019 гг. модельные оценки могут быть использованы для валидации спутниковых данных.

4. Заключение

Миссия GRACE внесла значительный вклад в решение ряда ключевых задач, стоящих перед гидрологией. Исследования проделали путь от простых воднобалансовых соотношений до более сложных методов, позволяющих совмещать преимущества дистанционных данных и физико-математического моделирования. На ранних стадиях находится разработка сервисов, позволяющих с помощью данных GRACE проводить не только мониторинг опасных гидрологических ситуаций, но и предсказывать их (Jäggi et al., 2019).

Благодаря своей точности (11 мм для площадей порядка 10^5 км^2) данные GRACE можно использовать для исследования динамики влагозапасов и их отдельных составляющих в сезонном и многолетнем разрезе. Так, было выявлено, что несмотря на продолжительную гидрологическую засуху в бассейне р. Дон в 2007–2016 гг., падение запасов подземных вод прекратилось уже в 2011 г. Важный вывод связан с подтверждением наличия систематического занижения количества твердых осадков на 20–25 % при существующей методике их измерения и корректировки. Выявленные различия в динамике TWS по данным GRACE и данным, рассчитанным с помощью модели ECOMAG, позволяют говорить о возможности их совместного

использования при ассимиляции или калибровки параметров модели для более точного и физически обоснованного моделирования речного стока.

Вместе с тем прогресс, достигнутый в качестве данных GRACE (с RL-01 до RL-06), связан с развитием вспомогательных моделей (гляциоизостатического поднятия, атмосферной циркуляции и др.) и методов расчета, потенциал развития которых, при неизменной инструментальной базе миссии, ограничен. Существуют технические сложности с функционированием текущей миссии. Акселерометр, установленный на один из спутников GRACE-FO, оказался неисправным. Для продолжения функционирования всей миссии был разработан алгоритм расчета показаний неисправного акселерометра, что, однако, сказалось на точности конечного продукта. Лазерный интерферометр, установленный на спутники GRACE-FO, не используется при расчете TWS , а функционирует с целью демонстрации его возможностей для дальнейших миссий, в том числе не связанных с изучением гидросферы Земли. При этом внедрение более точных измерительных приборов на спутники миссии GRACE не устранил основную проблему миссии, а именно — относительно грубое пространственно-временное разрешение данных (хотя несколько увеличит их точность). Запуска новых спутников в рамках миссии GRACE на данный момент не планируется.

Однако, если значительного прогресса в рамках самой миссии GRACE в ближайшие годы вряд ли стоит ожидать, то сам принцип, лежащий в основе миссии, может найти применение. За последние годы ряд компаний (OneWeb, Starlink и др.) заявили о планах по развертыванию группировок из десятков тысяч спутников на околоземной орбите, которые будут обмениваться информацией между собой с помощью лазеров. Функционирование подобной сети потребует создания центра, в который стекалась бы информация об орбитах спутников и который мог бы без участия человека принимать решения об их изменении для того, чтобы избежать столкновения между ними (Esa.int, 2020; Thespacereview.com, 2020), что может быть использовано для расчета аномалий гравитационного поля. Также, несмотря на отсутствие текущих планов по запуску новых спутников GRACE, инструментальная база миссии продолжает развиваться в рамках других проектов, в частности по исследованию гравитационных волн (LISA) (lisa.nasa.gov, n. d.).

Литература/References

- Bai, P., Liu, X. and Liu, C. (2018). Improving hydrological simulations by incorporating GRACE data for model calibration. *Journal of Hydrology*, 557, 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.025>
- Behrangi, A., Gardner, A. S., Reager, J. T. and Fisher, J. B. (2017). Using GRACE to constrain precipitation amount over cold mountainous basins. *Geophysical Research Letters*, 44, 219–227. <https://doi.org/10.1002/2016GL071832>
- Bogdanova, E. G., Il'in, B. M. and GavriloVA, S. Yu. (2007). Advanced methods for correcting measured precipitation and results of their application in the polar regions of Russia and North America. *Russian Meteorology Hydrology*, 32, 229–244. <https://doi.org/10.3103/S1068373907040036>
- Chen, J. (2019). Satellite gravimetry and mass transport in the earth system. *Geodesy and Geodynamics*, 10, 402–415. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.07.001>
- Dahle, C., Murböck, M., Flechtner, F., Döbbslaw, H., Michalak, G., Neumayer, K., Abrykosov, O., Reinhold, A., König, R., Sulzbach, R. and Förste, C. (2019). The GFZ GRACE RL06 Monthly Gravity Field Time Series: Processing Details and Quality Assessment. *Remote Sensing*, 11 (18), 2116. <https://doi.org/10.3390/rs11182116>

- Esa.int. (2020). *The ESA official website*. [online] Available at: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Automating_collision_avoidance [Accessed Jan. 29, 2020].
- Ferreira, V.G., Montecino, H.D., Yakubu, C.I. and Heck, B. (2016). Uncertainties of the gravity recovery and climate experiment time-variable gravity-field solutions based on three-cornered hat method. *Journal of applied remote sensing*, 10 (1), 015015. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.015015>
- gfz-potsdam.de. (n.d.). *GFZ official website*. [online] Available at: <https://www.gfz-potsdam.de/en/grace/> [Accessed Feb. 22, 2021].
- giovanni.gsfc.nasa.gov. (n.d.). *NASA data visualization and analysis tool*. [online] Available at: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov> [Accessed Feb. 22, 2021].
- globalfloods.eu. (2020). *Global Flood Awareness System official website*. [online] Available at: <https://www.globalfloods.eu/> [Accessed Feb. 22, 2021].
- Golosnoy, D.A. and Krylenko, I.N. (2017). Modeling of Onega river flow based on ECOMAG software package. In: *Trudy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskije issledovaniia i obrazovanie: MARESEDU — 2017"*. Tver: PoliPRESS Publ., 700–704. (In Russian)
- gracefo.jpl.nasa.gov. (n.d.). *GRACE-FO mission overview, JPL official website*. [online] Available at: <https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/overview/> [Accessed Feb. 22, 2021].
- Grigoriev, V. Yu. (2018). Water balance of river basins of European Russia. PhD thesis. Lomonosov Moscow State University. (In Russian)
- Grigoriev, V. Yu. and Frolova, N.L. (2018). Terrestrial water storage change of European Russia and its impact on water balance. *Geography, Environment, Sustainability*, 11 (1), 38–50. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-38-50>
- Humphrey, V., Gudmundsson, L. and Seneviratne, S.I. (2016). Assessing global water storage variability from GRACE: Trends, seasonal cycle, subseasonal anomalies and extremes. *Surveys in Geophysics*, 37 (2), 357–395. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9367-1>
- ipad.fas.usda.gov. (2020). *International production assessment division of US department of agriculture official website*. [online] Available at: https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/Default.aspx [Accessed Jan. 22, 2020].
- Jäggi, A., Weigel, M., Flechtner, F., Güntner, A., Mayer-Gürr, T., Martinis, S., Bruinsma, S., Flury, J., Bourgogne, S., Steffen, H., Meyer, U., Jean, Y., Sušnik, A., Grahl, A., Arnold, D., Cann-Guthauser, K., Dach, R., Li, Z., Chen, Q., van Dam, T., Gruber, C., Poropat, L., Gouweleeuw, B., Kvas, A., Klinger, B., Lemoine, J.-M., Biancale, R., Zwenzner, H., Bandikova, T. and Shabanloui, A. (2019). European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM) — from concept to implementation. *Geophysical Journal International*, 218 (3), 1572–1590. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz238>
- Jiang, D. and Wang, K. (2019). The Role of Satellite-Based Remote Sensing in Improving Simulated Streamflow: A Review. *Water*, 11 (8), 1615. <https://doi.org/10.3390/w11081615>
- Khaki, M., Hoteit, I., Kuhn, M., Awange, J., Forootan, E., van Dijk, A., Schumacher, M. and Pattiaratchi, C. (2017). Assessing sequential data assimilation techniques for integrating GRACE data into a hydrological model. *Advances in Water Resources*, 107, 301–316. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.001>
- Krylenko, I., Motovilov, Yu., Antokhina, E., Zhuk, V. and Surkova, G. (2014). Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions. In: *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*. IAHS Publ., 156–161.
- lisa.nasa.gov. (n.d.). *LISA mission official website*. [online] Available at: <https://lisa.nasa.gov/> [Accessed Feb. 22, 2021].
- Long, D., Longuevergne, L. and Scanlon, B.R. (2014). Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50 (2), 1131–1151. <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
- Lorenz, C., Kunstmann, H., Devaraju, B., Tourian, M. J., Sneeuw, N. and Riegger, N. (2014). Large-Scale Runoff from Landmasses: A Global Assessment of the Closure of the Hydrological and Atmospheric Water Balances. *Journal of Hydrometeorology*, 15 (6), 2111–2139. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0157.1>
- Mémin, A., Flament, T., Alizier, B., Watson, C. and Rémy, F. (2015). Interannual variation of the Antarctic Ice Sheet from a combined analysis of satellite gravimetry and altimetry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 422, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.03.045>

- Motovilov, Yu. G. and Gelfan, A. N. (2013). Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches. In: *Proceedings of H02, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013*. IAHS Publ., 360, 105–112. Available at: <https://iahs.info/uploads/dms/15555.360%20105-112.pdf> [Accessed Feb. 22, 2021].
- Motovilov, Yu., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A. (1998). *ECOMAG — regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*. Department of Geophysics, University of Oslo.
- nasagrace.unl.edu. (n. d.). *Groundwater and Soil Moisture Conditions from GRACE-FO Data Assimilation for the Contiguous U.S. and Global Land, National Drought Mitigation Center*. [online] Available at: <https://nasagrace.unl.edu/> [Accessed Feb. 22, 2021].
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M. R., Monaghan, A. and Lenaerts, J. T. (2011). Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38, L05503. <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL046583>
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W. and Lo, M.-H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Sasgen, I., van den Broeke, M., Bamber, J. L., Rignot, E., Sørensen, L. S., Wouters, B., Martinec, Z., Velicogna, I. and Simonsen, S. B. (2012). Timing and origin of recent regional ice-mass loss in Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 333–334, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.033>
- Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Sun, A. Y., Schmied, H. M., van Beek, L. P. H., Wiese, D. N., Wada, Y., Long, D., Reedy, R. C., Longuevergne, L., Döll, P. and Bierkens, M. F. P. (2018). Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 115 (6), E1080–E1089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704665115>
- Seo, J. Y. and Lee, S.-I. (2017). Total discharge estimation in the Korean Peninsula using multi-satellite products. *Water*, 9 (7), 532. <https://dx.doi.org/10.3390/w9070532>
- Swenson, S. (2010). Assessing High-Latitude Winter Precipitation from Global Precipitation Analyses Using GRACE. *Journal of Hydrometeorology*, 11, 405–420. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1194.1>
- Tangdamrongsub, N., Steele-Dunne, S. C., Gunter, B. C., Ditmar, P. G., Sutanudjaja, E. H., Sun, Y., Xia, T. and Wang, Z. (2017). Improving estimates of water resources in a semi-arid region by assimilating GRACE data into the PCR-GLOBWB hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (4), 2053–2074. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2053-2017>
- Thespacereview.com. (2020). *Publication devoted to cdzspace exploration*. [online] Available at: <https://www.thespacereview.com/article/3849/1> [Accessed Jan. 22, 2020].
- Tian, S., Tregoning, P., Renzullo, L. J., van Dijk, A., Walker, J. P., Pauwels, V. R. N. and Allgeyer, S. (2017). Improved water balance component estimates through joint assimilation of GRACE water storage and SMOS soil moisture retrievals. *Water Resources Research*, 53 (3), 1820–1840. <https://doi.org/10.1002/2016WR019641>
- Vishwakarma, B. D., Devaraju, B. and Sneeuw, N. (2018). What Is the Spatial Resolution of GRACE Satellite Products for Hydrology? *Remote Sensing*, 10 (6), 852. <https://doi.org/10.3390/rs10060852>
- Wahr, J., Molenaar, M. and Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B12), 30205–30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>
- Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V. and Velicogna, I. (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letters*, 31, 293–317. <https://doi.org/10.1029/2004GL019779>
- Wang, L., Chen, C., Ma, X., Fu, Z., Zheng, Y. and Peng, Z. (2020). Evaluation of GRACE mascon solutions using in-situ geodetic data: The case of hydrologic-induced crust displacement in the Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 707, 135606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135606>
- Wilby, R. (2019). A hydrology research agenda fit for the 2030s. *Hydrology Research*, 50, 1464–1480. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.100>
- Xu, T., Guo, Z. X., Xia, Y. L., Ferreira, V. G., Liu, S. M., Wang, K. C., Yao, Y., Zhang, X. and Zhao, C. (2019). Evaluation of twelve evapotranspiration products from machine learning, remote sensing and land surface models over conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 578, 124105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124105>

- Zotov, L. V., Frolova, N. L., Grigor'yev, V. Yu. and Kharlamov, M. A. (2015). Application of the satellite system of the earth's gravity field measurement (GRACE) for the evaluation of water balance in river catchments. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (4), 27–33. (In Russian)
- Zotov, L., Shum, C. and Frolova, N. (2015). Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE. In: S. Jin, N. Haghighipour, W. Ip, ed., *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances*. Berlin: Springer Geophysics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 45–59. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45052-9>

Статья поступила в редакцию 10 марта 2020 г.
Статья рекомендована к печати 14 декабря 2020 г.

Контактная информация:

Фролова Наталья Леонидовна — frolova_nl@mail.ru
Григорьев Вадим Юрьевич — vadim308g@mail.ru
Крыленко Инна Николаевна — krylenko_i@mail.ru
Захарова Елена Анатольевна — zavocado@gmail.com

State-of-the-art potential of the GRACE satellite mission for solving modern hydrological problems*

N. L. Frolova¹, V. Yu. Grigorev^{1,2}, I. N. Krylenko^{1,2}, E. A. Zakharova²

¹ Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

² Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences,

3, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russian Federation

For citation: Frolova, N. L., Grigorev, V. Yu., Krylenko, I. N., Zakharova, E. A. (2021). State-of-the-art potential of the GRACE satellite mission for solving modern hydrological problems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (1), 107–122. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.107> (In Russian)

The paper presents the main results of using the GRACE mission in fields of study such as estimations of the components of basin water storage and water balance, and hydrological modeling. The estimate of error of GRACE data is in the order of 11 mm for watersheds with an area of 100 000 km² and decreases with an increase of basin area. This accuracy made it possible to identify long-term and seasonal variability of water storage. It was shown that the decrease in total water storage in the Don basin for 2002–2019 is approximately equally caused by both soil moisture and groundwater changes. At the same time, the minimum level of groundwater was already reached in 2010; the minimum level of soil moisture — in 2015. Since 2016, Don basin groundwater changes very little during the winter period, which is likely due to the increased number of thaws and thinning of the freezing layer during this period. Based on the precipitation data from meteorological stations for the cold period of European Russia, the value of their systematic error was estimated at about 20–25 %. The comparison of the values of total water storage for the river basins of the northern part of European Russia, according to GRACE data and ECOMAG runoff modeling results, has shown their good coincidence (NSE = 0.78 ÷ 0.89). In comparison with GRACE, ECOMAG shows a smaller increase in water storage during the winter and a faster decline during the spring flood period. Currently,

* This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant No. 16-05-00753 A – GRACE data processing, No. 18-05-60021 – Arctic research).

progress in the use of GRACE in hydrology is limited by the low spatial-temporal resolution of data, which, within the framework of the GRACE mission itself, will not be improved in the coming years. At the same time, the principle of GRACE operation can be applied in the future to various satellite constellations.

Keywords: monitoring, space gravimetry, water resources, hydrological models.

Received: March 10, 2020

Accepted: December 14, 2020

Contact information:

Natalia L. Frolova — frolova_nl@mail.ru

Vadim Yu. Grigorev — vadim308g@mail.ru

Inna N. Krylenko — krylenko_i@mail.ru

Elena A. Zakharova — zavocado@gmail.com