

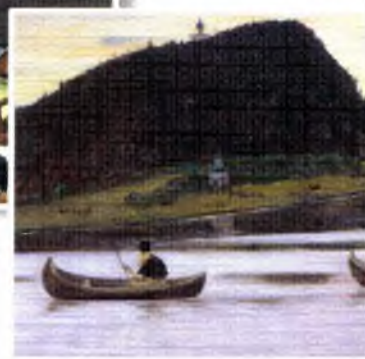
Международная научно-практическая конференция
памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова

ВТОРЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Искусство гидрологии



non est modo felix
felix est qui fides
restat in die ultimo
non fides sine opere
non est sine opere



18-22 ноября 2015 года

Санкт-Петербургский
государственный университет

Россия

5. Лыткина Л.П. Динамика растительного покрова на горях лиственничных лесов Лено-Амгинского междуречья: Центральная Якутия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, Якутск, 2005, 200 с.
6. Семенова О.М., Лебедева Л.С., Волкова Н.В., Шалина Е.В. (2015) Использование спутниковых данных для исследования процессов формирования стока в бассейне р. Витимкан (зона распространения многолетней мерзлоты). Исследование Земли из космоса, № 3, с. 15–26
7. Ebel, B. A. (2013), Simulated unsaturated flow processes after wildfire and interactions with slope aspect, *Water Resour. Res.*, 49, 8090–8107, doi:10.1002/2013WR014129.
8. Feikema P.M., Sherwin C.B. and Lane P.N.J. 2013 Simulating the combined effects of climate and wildfire on streamflow// 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013
9. Henderson G.S., D.L. Golding The effect of slash burning on the water repellence of forest soils at Vancouver, British Columbia // *Can J For Res*, 1983, 13:353–355
10. Huffman E.L., L.H. MacDonald and J.D. Stednick Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range // *Hydrol Process* 2001, 15:2877–2892
11. Imeson A.C., J.M. Verstraten, E.J. van Mulligen, and J. Sevink The effects of fire and water repellence on infiltration and runoff under Mediterranean type forest // *Catena* 1992, 19:345–361
12. Lebedeva L., Semenova O. and Vinogradova T. (2014) Simulation of Active Layer Dynamics, Upper Kolyma, Russia, using the Hydrograph Hydrological Model. *Permafrost and Periglac. Process.*, 25 (4): 270–280. DOI: 10.1002/ppp.1821
13. Seibert J., McDonnell J. J. and Woodsmith R. D. Effects of wildfire on catchment runoff response: a modelling approach to detect changes in snow-dominated forested catchments // *Hydrol. Res.*, 2010, 41, 378–390, doi:10.2166/Nh.2010.036
14. Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu. (2013) Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia. *Hydrogeology Journal*, 21 (1), 107–119. DOI:10.1007/s10040-012-0936-1
15. Semenova, O., Lebedeva, L., Volkova, N., Korenev, I., Forkel, M., Eberle, J., et al. (2014). Detecting immediate wildfire impact on runoff in a poorly-gauged mountainous permafrost basin. *Hydrological Sciences Journal*. doi:10.1080/02626667.2014.959960.

Новые возможности междисциплинарных исследований: гравитационное поле Земли и гидрология

Фролова Н.Л.¹, Зотов Л.В.^{1,2}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва*
frolova_nl@mail.ru

Авторы статьи полностью согласны с точкой зрения Ю.Б. Виноградова о том, что «гидрология и учение о стоке должны широко пользоваться концепциями, результатами и опытом всех наук о Земле [2]. За их счет они должны расширять свои методические возможности и, в свою очередь, обогащать их гидрологическими знаниями и подходами». В данной работе речь пойдет о спутниковой гравиметрии и использовании ее данных для гидрологических исследований. Гравиметрия – наука с давней историей. Методы гравиметрических измерений совершенствовались на протяжении всего XX века. Космическая эра открыла путь к полномасштабному исследованию глобального гравитационного поля планеты, включая труднодоступные протяженные территории. Большой объем данных дистанционного зондирования

Земли позволил продвинуться в геофизических, геологических, океанографических исследованиях. За рубежом появилось много работ, связанных с применением современных гравиметрических данных в гидрологии. Опыт и знания наших специалистов в области гравиметрии позволяют ликвидировать имеющийся пробел в отечественных исследованиях[1].

Временные вариации глобального гравитационного поля, измеряемые спутниками-близнецами GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment – Эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата), разработанные NASA/DLR GRACE, революционизировали гидрологию речных бассейнов, дали широкие возможности при изучении последствий изменений климата. Суммарный эффект от перераспределения масс в оболочках Земли приводит к изменениям гравитационного поля, что в свою очередь отражает перераспределение поверхностной и почвенной влаги, таяние льдов, выпадение осадков и испарение на больших пространствах.

Спутники-близнецы GRACE были запущены с космодрома г. Плесецк российским носителем «Рокот» 17.03.2002 г. Спутниковая система GRACE (Германия – США) была 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 (около 500 км). Слежение за траекториями этих спутников осуществляется с помощью системы высоколетящих спутников систем GPS (США) и GLONASS (Россия). Одновременно при помощи микроволнового дальномера производится высокоточное измерение расстояния между спутниками, скорость изменения которого 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 – 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 является исходной величиной, содержащей 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., получая продукт первого уровня (L1). Затем, с использованием сложного алгоритма решения обратной задачи с регуляризацией, внося поправки на изменения атмосферного давления над сушей и океаном, на величину твердотельного, океанического, полярного прилива и др., получают данные второго уровня (L2), представляющие собой разложение ежемесячного гравитационного поля по коэффициентам Стокса на сфере со средним радиусом Земли. При вычитании среднего поля из ежемесячных коэффициентов Стокса, получаемых с GRACE, можно наблюдать изменения от месяца к месяцу с точностью до микроГала ($1 \text{ Гал} = 0.01 \text{ м/с}^2$). 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. Их причиной являются полярные орбиты обоих спутников, недостаточно хорошее отражение гравитационного сигнала и др. Научные группы работают над созданием оптимальных алгоритмов фильтрации этих шумов в данных GRACE [3, 5]. Пространственное разрешение регистрируемых данных в среднем составляет 300 км и оно 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 могут быть отнесены движению водных масс внутри континентальной части гидрологического цикла [7].

Таким образом, в настоящее время проект GRACE выполняет на основе спутниковых технологий глобальные наблюдения за изменением запасов воды в месячных интервалах и с пространственным разрешением от уровня крупных речных бассейнов ($>200\ 000\ \text{км}^2$) [6] до континентов [6]. Недавние оценки изменений запасов воды показали хорошую согласованность данных гидрологических моделей и наблюдений [4]. Более того, месячные изменения запасов воды на суше, полученные GRACE, позволили рассчитывать важнейшие составляющие гидрологического цикла, включая суммарное испарение, сток, осадки минус испарение ($P - E$), изменения запасов подземных вод, а также, что наиболее важно, невязку водного баланса в различных масштабах. Точность расчетов изменения запасов воды находится в пределах 1,5 см и менее в зависимости от географической области, для которой усреднены данные. Основные проблемы связаны с учётом и устранением разного рода помех.

Измерения гравитационного поля со спутника раскладываются по сферическим и естественным ортогональным функциям, производится 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 [3]. В результате из рядов аномалий силы тяжести получают ряды эквивалентной толщины водного слоя в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и интервалом по времени в 1 месяц.

В свободном доступе есть данные с различной степенью предварительной обработки (например, <http://geoid.colorado.edu/grace>). В нашем случае источником информации послужил сайт Калифорнийского технологического института [<http://grace.jpl.nasa.gov/data/gracemonthlymassgridsland>], где размещены данные в версии RL05-01 (с вычетом из слоя влагозапаса атмосферной составляющей) для поверхности суши, в пространственно-временном разрешении $1^\circ \times 1^\circ$ на один месяц, в формате NetCDF. Результаты последовательной и весьма сложной обработки гравиметрических данных преобразованы в эквивалентный уровень воды, выраженный в сантиметрах [8].

Цель данного исследования – оценка возможности использования данных GRACE для оценки составляющих водного баланса крупных речных водосборов России и их изменений.

Обработанная нами гравиметрическая информация представлена в виде осредненных данных об эквивалентном уровне воды для крупнейших речных бассейнов России. 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, маловодье 2010 и 2014 г. 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 заданному среднему. Полученные данные хорошо согласуются с полями аномалий сезонной и месячной температуры приземного воздуха на территории ЕТР летом 2010 г. и данными по стоку рек. Реки Европейской территории 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 на всей территории России.

Точная физическая интерпретация полученных сигналов со спутников требует сравнения с гидрологическими моделями (GLDAS, WGHM) и наземными наблюдениями. В качестве источника данных по осадкам, испарению и стоку были взяты данные GLDAS (Global Land Data Accumulated System) версии 2.0 с сайта [<http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/>]. Они содержат информацию за каждый месяц с 1948 г. по текущее время в узлах географической сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. В целом процедура обработки данных для GLDAS-2 не отличается от GRACE, за тем исключением, что данные по осадкам получались в узлах сетки, как сумма твёрдых и жидких осадков, а стока как сумма поверхностного и подповерхностного. Как данные предшествующих исследователей [6], так и наши оценки изменений запасов воды по методу GRACE показали их хорошую согласованность с гидрологическими моделями поверхности суши.

Выводы. Спутниковая гравиметрия GRACE является современным методом дистанционного изучения Земли. Для больших по площади территорий она представляет важный источник получения разнообразной геофизической информации, в том числе гидрологической. Данные GRACE могут быть использованы для оценки таяния ледников, изменения водных ресурсов крупных речных бассейнов и территорий под влиянием климатических и антропогенных факторов. Дистанционная информация хорошо согласуется с данными гидрологических моделей и натурными измерениями величины речного стока для отдельных периодов времени.

При всей оперативности и относительной точности измерений по технологии GRACE все еще остаётся существенной проблема низкой пространственной разрешающей способности выходных данных (300–400 км). Следует отметить также недостаточную точность измерений GRACE при оценке роли различных составляющих водных ресурсов. Вместе с тем, точность получаемых результатов повышается при увеличении размеров речного бассейна. Пространственно-временное разрешение данных GRACE можно компенсировать более широким привлечением существующих моделей формирования вод суши и данных наземного мониторинга.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00155).

Литература

1. Булычёв 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 // Водные ресурсы. 2012. № 5. С. 476–484.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М., Издательский центр «Академия». 2008. 320 с.

3. Зотов Л., Носова С., Баринов М. Многоканальный сингулярный спектральный анализ данных по гравитационному полю со спутников GRACE // Труды 37-го международного семинара им Успенского. ИФЗ РАН Москва, 2010. С. 25–29.
4. Frappart F., Ramillien G., Famiglietti J.S. Water balance of the Arctic drainage system using GRACE gravimetry products // *International Journal of Remote Sensing*. 2011. 32: Pp. 431–453. doi:10.1080/01431160903474954
5. Schmidt R., Flechtner F., Meyer U. Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites // *Surveys in Geophysics*. 2008. V. 29. № 4, 5. Pp. 319–334.
6. Syed Tajdarul H., Famiglietti J.S., Rodell M. et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS // *Water Resources Research*. 2008. V. 44. Pp. 1–15.
7. 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 // *Journal of Geophysical Research*. 1998. 103. Pp. 32205-30229.
8. Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE. In book: *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances*. Springer Geophysics, 2015. pp. 45-59.