Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE)

А.В. Киселёв¹, Н.Р. Муратова², В.И. Горный¹, А.А. Тронин¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН Санкт-Петербург, 197110, Россия E-mail: andrey.kiselev@gmail.com ² Национальный центр космических исследований и технологий Алматы, 050010, Казахстан E-mail: nmuratova@mail.ru

Работа посвящена анализу возможности применения вариаций поля силы тяжести Земли, измеряемых спутниками GRACE для картирования продуктивной влаги в почве. Измерения продуктивной влаги почвы выполнены на Караболыкском, Заречненском, Аркалыкском, Карасуйском тестовых полигонах Республики Казахстан на трех глубинах: 0,0–0,2 м; 0,2–0,5 м; 0,5–1,0 м. Проведен корреляционный анализ между значениями продуктивной влаги почвы (наземные данные) и толщины эффективного слоя влажности (ТЭСВ) по данным GRACE. Показано, что для слоя на глубинах 0,5–1,0 м наблюдается достоверная статистическая связь между продуктивной влагой почвы и ТЭСВ. Кроме того, отмечена надежная связь между ТЭСВ и толщиной снежного покрова. Сделан вывод о том, что результаты измерений ТЭСВ, полученные спутниками GRACE в комплексе с наземными измерениями продуктивной влаги на тестовых полигонах, могут быть положены в основу регионального мониторинга продуктивной влаги почвы. Показано, что перспективным является применение результатов измерений ТЭСВ спутниками GRACE для картирования влагозапаса в снежном покрове бассейнов крупных рек.

Ключевые слова: спутник, GRACE, сила тяжести, вариации, почва, продуктивная влага, корреляция

Введение

Одним из основных условий успешного растениеводства является обеспеченность возделываемых земель водой. Уровень водообеспеченности территории определяется гидрологическими и метеорологическими факторами, мелиоративными мероприятиями. Поэтому информация о водном режиме корнеобитаемого слоя почвы служит основой для прогнозирования урожая.

Картографирование, а тем более прогнозирование влагообеспеченности земель дистанционными методами, является актуальной, но сложной задачей. В настоящее время для этого применяются в основном активные и пассивные дистанционные методы СВЧ диапазона электромагнитных волн. К подобным съемочным системам относятся: европейский спутник SMOS (измерение влажности почвы и солености океана); конический микроволновый сканер-зондировщик CMIS (NOAA), пассивный многочастотный радиометр AQUA (AMSR) и активная/пассивная система измерения влажности почвы, установленная на спутнике SMAP (NASA). Недостатком методов СВЧ диапазона является большое количество неизвестных факторов, влияющих на процесс отражения/излучения земной поверхностью СВЧ сигнала: рельеф и шероховатость поверхности; растительный покров; тип и засоление почв. В результате методы СВЧ диапазона, как правило, с достаточной для практики точностью картографируют влагосодержание почв только в аридных регионах, где влияние растительности минимально. Территория же России в значительной степени покрыта лесами, что существенно снижает возможности применения методов СВЧ диапазона для картирования и прогнозирования влагосодержания почв.

В последние десятилетия разрабатывается новый дистанционный метод – высокоточная спутниковая гравиметрия, позволяющая измерять пространственно-временные вариации поля силы тяжести Земли, вызванные изменением масс как в земных недрах, так и в атмосфере (Tapley et al., 2006). Появились результаты, показывающие наличие корреляций между уровнем воды в реках и амплитудой временных вариаций поля силы тяжести (Khan, 2013). В связи с этим открылась возможность изучения связи между амплитудами вариаций поля силы тяжести Земли и влагообеспеченностью территорий. Предполагалось, что высокоточная спутниковая гравиметрия, базирующаяся на универсальном законе всемирного тяготения, из-за меньшего количества неучтенных факторов позволит картировать влагосодержание территорий с большей достоверностью, чем методы СВЧ диапазона.

Целью настоящей статьи является исследование возможности использования данных высокоточной спутниковой гравиметрии, полученных системой GRACE, для оценки запасов продуктивной влаги в почве. В качестве объекта исследования выбраны тестовые участки в сельскохозяйственных районах Северного Казахстана: Карабалык, Заречное, Аркалык и Караман-Карасу (*puc. 1*).



Рис. 1. Карта тестовых участков. Условные обозначения: 1. участки, на которых выполнялись наземные измерения влажности почв; 2. метеостанции; 3. водоемы; 4. дорожная сеть; 5. административные границы

Материалы и методы

Высокоточная спутниковая гравиметрия

Орбитальная система для высокоточных измерений гравитационного поля Земли GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) представляет собой тандем из двух идентичных спутников, находящихся на высоте 300–500 км на околополярной орбите на расстоянии 220 км друг от друга (Tapley et al., 2006). Спутниковая система с высокой точностью в квазинепрерывном режиме измеряет расстояние между аппаратами, что дает возможность регистрировать флуктуации гравитационного поля. Когда первый спутник входит в зону действия более значительных масс, он отклоняется от первоначальной траектории и, соответственно, от следующего за ним второго аппарата. По результатам изменения координат первого спутника относительно второго вычисляется значение гравитационной аномалии. Прецизионные акселерометры позволяют отличить влияние аэродинамического сопротивления атмосферы на траекторию спутника от воздействия гравитационного поля Земли. Совместно с данными глобальной системы позиционирования GPS эти измерения дают возможность строить карты гравитационного поля Земли. Такие карты строятся с периодичностью раз в месяц.

Изменения (вариации) гравитационного поля во времени вызываются динамическими процессами в литосфере, атмосфере, мировом океане, изменением влажности почв, вызванным гидрологическими циклами. Система GRACE находится в рабочем режиме с 2002 г., и данные наблюдений покрывают всю поверхность земного шара. Это определяет потенциальную возможность ретроспективного анализа динамики изменения и мониторинга влагозапаса почв практически любого участка суши за указанный период.

Одним из стандартных продуктов миссии GRACE является толщина эффективного слоя воды (ТЭСВ) (Swenson, Wahr, 2006). Карты ТЭСВ строятся для всей поверхности земного шара с дискретностью в один угловой градус, т.е. характерный размер элементарной ячейки в экваториальной зоне близок к 111 км. ТЭСВ поставляется в виде стандартного продукта, представляющего собой отклонение поля силы тяжести относительно среднего многолетнего уровня, вычисленного за период 2004–2009 гг. Абсолютная погрешность восстановления ТЭСВ по результатам месячного цикла измерений варьируется в зависимости от широты исследуемого региона, а также региональных климатических факторов и объема выпавших осадков (Landerer, Swenson, 2012). Для рассматриваемого региона Республики Казахстан общая среднеквадратическая погрешность измерений ТЭСВ составляет около 2 см.

Наземные измерения влажности почвы

Для изучения статистических связей между ТЭСВ по данным GRACE (Swenson, 2012) и запасами продуктивной влаги использованы результаты наземных измерений на тес-

товых участках Северного Казахстана (Спивак, Муратова, 2011). Пробы почв отбирались с помощью ручного почвенного бура. Влажность проб определялась термостатно-весовым методом (Инструкция..., 2006). Продуктивная влага выражена толщиной в сантиметрах слоя воды, что позволяет сопоставлять ее запасы с данными GRACE, а также с метеорологическими данными о количестве осадков, которые также указываются в виде толщины слоя воды.

Использованы 104 наземных измерения влажности почв в трех слоях на глубинах 0–0,2 м, 0,2–0,5 м и 0,5–1,0 м. Точки отбора проб обеспечены GPS-координатами. Измерения выполнялись с 2006 по 2008 гг. в период с мая по октябрь. Точечные измерения усреднялись по площади каждого из исследуемых участков. Эти усредненные значения влажности почв (*табл. 1*) использовались в дальнейшем анализе.

Таблица 1. Средние значения запасов продуктивной влаги в почве на различных участках Северного Казахстана, полученные термостатно-весовым методом

H anna	Район	Запасы продуктивной влаги, см		
Дата,		Глубины		
00.,11.11.2222		0,0 м – 0,2 м	0,2 м – 0,5 м	0,5 м — 1,0 м
05.05.2007	Карабалык	2,4	3,9	5,9
26.06.2007		0,9	1,5	4,3
27.07.2007		1,2	1,4	1,9
15.05.2008		2,2	5,0	6,1
12.07.2008		0,2	1,2	3,5
15.05.2007		1,7	2,5	4,0
20.06.2007		1,2	2,1	5,4
19.07. 2007		1,2	1,8	4,3
17.05.2008	Заречное	1,6	1,3	2,5
20.06.2008	1	0,9	3,0	7,8
29.09.2008		1,2	0,1	0,6
26.05.2006		0,8	2,4	2,7
23.10.2006		2,3	1,5	2,3
26.05.2007		1,6	4,2	4,3
07.07.2007		0,1	0,8	2,2
29.10.2007	Аркалык	1,6	1,1	2,2
08.04.2008		2,3	5,3	5,3
05.06.2008		0,9	3,2	4,0
05.07.2008		2,6	3,6	4,5
21.10.2008		1,0	0,8	1,7
25.05.2006	Карасу	3,6	4,0	2,0
25.06.2006		1.5	2.2	1.4
21.07.2006		0,8	1,9	0,8
22.05.2007		3,4	3,9	4, 5
30.06.2007		2,6	3,0	3,2
25.07.2007		1,6,	2,7	2,2
20.05.2008		3,5	3,8	1,9
20.06.2008	,	1,1	2,0	1,2
20.08.2008		3,3	3,9	2,4

Помимо данных о запасах продуктивной влаги в исследовании использованы результаты метеорологических наблюдений (Данные..., 2015; Global..., 2015), выполненных на метеостанциях, ближайших к участкам, на которых измерялась влажность почв. Для сопоставления привлекались такие параметры, как температура воздуха на высоте 2 м от поверхности земли, количество осадков, высота снежного покрова. Значения ТЭСВ по данным GRACE использовались строго для тех же участков, для которых получены усредненные значения влажности почв по данным наземных измерений. Кроме интерполяции по латерали данные GRACE интерполировались и по времени, поскольку они имеют дискретность в один месяц и привязаны к 15-му числу каждого месяца, а наземные измерения влажности почв отнесены к иным датам того же месяца.

Как было отмечено выше, система GRACE реагирует на изменения количества воды, содержащейся во всем столбе под спутником, включая влагу в атмосфере. Для учета влияния влагосодержания атмосферы на оценку влагозапаса почвы в ТЭСВ по данным GRACE вносились поправки за содержание водяного пара в атмосфере. Для этого использовались результаты измерения ТЭСВ атмосферы, полученные инфракрасным зондировщиком AIRS атмосферы, установленном на спутнике AQUA (AIRS Science Team, Texeira, 2013). Эти данные, как и данные GRACE, имеют дискретность в один месяц и для сопоставления с данными наземных измерений влажности также интерполировались как по времени, так и по площади. В *табл. 2* приведены значения ТЭСВ по данным спутников GRACE и AQUA.

Дата, дд.мм.гггг	Район	ТЭСВ по GRACE, см	ТЭСВ атмосферы по AIRS/AQUA, см	ТЭСВ по GRACE, исправленная на количество водяного пара в атмосфере, см
05.05.2007	Карабалык	10,7	0,3	10,5
26.06.2007		6,9	0,9	5,9
27.07.2007		3,5	1,1	2,1
15.05.2008		3,9	0,5	3,7
12.07.2008		-1,3	1,3	-2,6
15.05.2007	Заречное	9,2	0,5	8,7
20.06.2007		6,3	0,8	5,4
19.07. 2007		3,5	1,3	2,1
17.05.2008		3,7	0,4	3,4
20.06.2008		1,7	0,8	0,9
29.09.2008		-5,1	0,2	-5,2
26.05.2006	Аркалык	0,2	0,7	-0,4
23.10.2006		-5,7	-0,1	-5,6
26.05.2007		6,0	0,5	5,4
07.07.2007		2,5	1,0	1,3
29.10.2007		-4,5	-0,3	-4,2
08.04.2008		4,3	-0,3	4,6
05.06.2008		0,5	0,4	-0,1
05.07.2008		-1,4	1,0	-2,7
21.10.2008		-5,6	-0,1	-5,3
25.05.2006	Карасу	1,4	0,5	0,9
25.06.2006		-0,1	1,1	-1,2
21.07.2006		-3,8	0,9	-4,7
22.05.2007		9,5	0,6	9,0
30.06.2007		5,9	1,0	4,8
25.07.2007		2,7	1,2	1,3
20.05.2008		3,9	0,5	3,5
20.06.2008		1,3	0,7	0,4
20.08.2008		-4,7	1,0	-5,7

Таблица 2. Сравнение результатов спутниковых измерений ТЭСВ по данным спутников GRACE и AQUA

Для сопоставления с результатами измерений GRACE данные спутника AQUA были пересчитаны в ТЭСВ, отсчитываемую относительно среднего многолетнего уровня за период 2004–2009 гг.

Результаты

Установлено наличие статистически значимой зависимости наземных измерений запасов продуктивной влаги в почве и ТЭСВ по данным GRACE, причем сила этой связи увеличивается с глубиной (*puc. 2*). Так, для почвенного слоя, залегающего на глубине до 0,2 м, коэффициент корреляции Пирсона составляет всего 0,23. При этом статистическая достоверность этого результата не позволяет отвергнуть гипотезу об отсутствии связи (р-значение составляет 0,24, что существенно превосходит порог 0,05, соответствующий доверительному интервалу в 95%). Но уже для слоя почвы на глубине 0,2–0,5 м этот коэффициент составляет 0,45 при р-значении 0,015, меньшем порогового 0,05, что говорит о наличии значимой статистической связи между этими параметрами. Еще сильнее связь между данными GRACE и влажностью слоя почвы на глубинах 0,5–1,0 м. В этом случае коэффициент корреляции 0,56 при р-значении 0,002 (существенно меньше 0,05).

Сопоставление данных системы GRACE с результатами наблюдений на метеостанциях, расположенных вблизи рассматриваемых участков показало, что вариации поля силы тяжести имеют строгую связь как с толщиной снежного покрова (*puc. 3*), так и с температурой воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью. При этом анализ кросс-корреляций показал, что ТЭСВ по GRACE изменяется синфазно с толщиной снежного покрова. В то же время, имеется 2-х месячный фазовый сдвиг между ТЭСВ по GRACE и температурой воздуха. При этом ТЭСВ по GRACE опережает температуру воздуха. Это не противоречит известному факту, что повышение средней температуры воздуха вызывает активное снеготаяние и сток талой воды, что приводит к уменьшению поля силы тяжести.

Обсуждение результатов

Степень корреляции наземных наблюдений с данными спутниковых наблюдений GRACE не очень высока по причине того, что наземные данные носят локальный, точечный характер, а спутниковая система GRACE измеряет региональную характеристику с латеральным разрешением приблизительно 100×100 км, поэтому корреляцию с коэффициентом 0,56 следует признать существенной. Кроме того, спутниковые измерения несут информацию об общем запасе воды на всех глубинах, а не только в верхнем слое почвы, который исследуется наземными методами измерения влажности, поэтому связь между этими двумя параметрами априори не может быть очень сильной.



Рис. 2. Сопоставление исправленных за содержание пара в атмосфере данных ТЭСВ по GRACE с результатами наземных измерений запасов продуктивной влаги в почве по слоям: а) глубина 0,0–0,2 м, коэффициент корреляции 0,23, р-значение 0,24; б) глубина 0,2–0,5 м, коэффициент корреляции 0,45, р-значение 0,015; в) глубина 0,5–1,0 м, коэффициент корреляции 0,56, р-значение 0,002. Условные обозначения: 1 – точки измерений, 2 – линии регрессии



Рис. 3. Сравнение ТЭСВ-GRACE с высотой снежного покрова (слева) и кросс-корреляции этих периодических величин (справа) по данным измерений на метеостанциях в населенных пунктах: а) Аркалык, б) Кустанай, в) Комсомолец.

Условные обозначения: 1 – ТЭСВ по данным GRACE, 2 – среднемесячная высота снежного покрова, 3 – доверительный интервал 95%

Возрастание степени связи с глубиной также является важным результатом и говорит о том, что влажность верхних слоев почвы сильнее зависит от локальных характеристик почв и изменений в погоде. Влажность почвы на глубине в основном определяется долговременными гидрологическими факторами и, в первую очередь, инфильтрацией влаги в нижние горизонты почвы при снеготаянии и в периоды дождей.

Проведенное исследование свидетельствует о том, что значения поля силы тяжести позволяют оценить запасы воды в региональном масштабе и подойти к решению проблемы прогнозирования влагозапаса в плодородном слое почвы и, в результате, урожайности сельскохозяйственных культур. Комплексное использование данных спутниковых измерений вариаций поля силы тяжести, метеоданных и измерений влажности почвы открывает путь к ежемесячному построению карт влагообеспеченности сельскохозяйственных районов по данным спутниковых измерений поля силы тяжести Земли и влажности почвы на тестовых полигонах. Спутниковые измерения проводятся в непрерывном режиме и на значительных территориях, что позволяет экстраполировать данные ТЭСВ по GRACE на территории, где наземные измерения влажности не проводились.

Особенно следует обратить внимание на наличие корреляций между данными GRACE и толщиной снежного покрова. Это открывает перспективу разработки метода картографирования запасов воды в снежном покрове бассейнов крупных рек на основе данных GRACE, что является актуальной задачей, необходимой для решения проблемы надежного прогнозирования масштаба весенних паводков.

В заключение могут быть сделаны следующие выводы.

Вариации поля силы тяжести Земли несут в себе информацию о консервативной (глубинной) составляющей запасов воды в почве, что открывает возможность разработки надежного метода картографирования этих запасов на основе комплексирования результатов спутниковых мониторинговых и наземных наблюдений на тестовых полигонах.

Открывается возможность использования спутниковых измерений вариаций поля силы тяжести Земли для разработки надежного метода картографирования запасов воды в снежном покрове бассейнов крупных рек для любых физико-географических зон, в том числе и для зоны тайги, где затруднено использование дистанционных методов СВЧ диапазона электромагнитных волн.

Литература

- 1. Данные метеорологических наблюдений из архива сайта «Расписание Погоды» (http://rp5.ru), 2015.
- Инструкция по проведению работ на подспутниковых полигонах сельскохозяйственного профиля. ИКИ ЦАФИ МОН РК, г. Алматы, 2006. 3. Спивак Л.Ф., Муратова Н.Р. Космический мониторинг сельскохозяйственного производства в Казах-
- стане. Земля из космоса. Наиболее эффективные решения // Технологии ДЗЗ для сельского хозяйства и агрострахования. Выпуск 9. Весна 2011. С. 57–65. http://www.zikj.ru/images/archive/no9/no9_spivak_8.pdf (10.08.2015).
- AIRS Science Team/Joao Texeira (2013), Aqua AIRS Level 3 Monthly Standard Physical Retrieval (AIRS+AMSU), version 006, Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center (GES DISC), doi:10.5067/AQUA/AIRS/DATA319.
- 5. Global Summary of the Day (GSOD), NCDC Climate Services Branch (http://www7.ncdc.noaa.gov/), 2015.
- *Khan Haris Hasan, Khan Arina, Ahmed Shakeel, Gennero Marie-Claude, Minh Kien Do, Cazenave Anny.* Terrestrial water dynamics in the lower Ganges estimates from ENVISAT and GRACE // Arabian Journal of Geosciences. 2013. Vol. 6. No. 10. P. 3693–3702.
- *Landerer F.W., Swenson S.C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. Vol. 48. W04531. 11 p. doi: 10.1029/2011WR011453.
- Swenson S.C. GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA. 8. Dataset accessed 2015-06-13 at http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005. 2012. Swenson S.C., Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // Geophys. Res. Lett. 2006.
- 9. Vol. 33. L08402. doi:10.1029/2005GL025285,.
- 10. Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L09607, doi:10.1029/2004GL019920.

Relation between available water content in soil and gravity force (from GRACE data)

A.V. Kiselev¹, N.R. Muratova², V.I. Gornyy¹, A.A. Tronin¹

¹Saint Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS St. Petersburg, 197110, Russia *E-mail:* v.i.gornvv@mail.ru ²National Center of Space Research and Technology Almaty, 050010, Kazakhstan

An analysis of possibility to map available water content (AWC) of soil by using variations of gravity force was performed. AWCs of soils were measured at depths 0.0–0.2 m; 0.2–0.5 m; 0.5–1.0 m at Karabolyk, Zarechensk, Arkalyk, and Karasoo agricultural test sites of Republic of Kazakhstan. The correlations between AWC and thickness of effective water layer from GRACE data were investigated. The reliable statistic link between AWC and thickness of effective water layer was noticed for the soil layer at 0.5–1.0 m depth. Moreover, the reliable statistical link between thickness of effective water layer and snow cover thickness was obtained. The conclusion is that thickness of effective water layer, measured by GRACE together with ground level available water content measurements at test sites could be the basis for regional AWC monitoring. It was concluded that GRACE data can be quite promising for snow water supplies mapping inside big river basins.

Keywords: satellite, GRACE, gravity force, variations, soil, available water content, correlation

References

- http://rp5.ru/. 1.
- Instruktsiva po provedenivu rabot na podsputnikovych poligonach sel'skokhozyaistvennogo profilva (Instruction 2 how to carry out ground level verifications of satellite data at agricultural test sites), IKI TsAFI MON RK, Almaty, 2006.
- Spivak L.F., Muratova N.R., Kosmicheskii monitoring sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva v Kazakhstane 3. (Ŝatellite monitoring of agriculture in Kazakhstan), Zemlya iz kosmosa, Naibolee effektivnye resheniya, Tekhnologii DZZ dlya sel'skogo khozyaistva i agrostrakhovaniya, Edition 9, Vesna 2011, pp. 57–65, available at:
- http://www.zikj.ru/images/archive/no9/no9_spivak_8.pdf (10.08.2015). AIRS Science Team/Joao Texeira (2013), *Aqua AIRS Level 3 Monthly Standard Physical Retrieval (AIRS+AMSU), version 006*, Greenbelt, MD, USA:NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center (GES 4 DISC), doi:10.5067/AQUA/AIRS/DATA319.
- Global Summary of the Day (GSOD), NCDC Climate Services Branch (http://www7.ncdc.noaa.gov/), 2015. 5.
- Khan Haris Hasan, Khan Arina, Ahmed Shakeel, Gennero Marie-Claude, Minh Kien Do, Cazenave Anny, Terrestrial water dynamics in the lower Ganges estimates from ENVISAT and GRACE, Arabian Journal of 6 *Geosciences*, 2013, Vol. 6, No. 10, pp. 3693–3702. Landerer F.W. and Swenson S. C., Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources*
- 7. Research, 2012, Vol. 48, W04531, 11 p., doi: 10.1029/2011WR011453.
- Swenson S. C., 2012, *GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0.* PO.DAAC, CA, USA, Dataset accessed 2015-06-13 at http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005. 8.
- Swenson S.C., Wahr J., Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, Geophys.Res.Lett., 2006, 9 Vol. 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285.
- Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, Vol. 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.