Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE)

А.В. Киселёв, В.И. Горный, С.Г. Крицук, А.А. Тронин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 197110, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Работа посвящена анализу возможности применения временных рядов вариаций поля силы тяжести Земли за 13-летний период, измеренных спутниковой системой GRACE. Для повышения надежности картографирования влагосодержания территорий на основе регистрации вариаций поля силы тяжести Земли использованы поправки на содержание водяного пара в атмосфере, выполненные по данным спутникового инфракрасного зондировщика атмосферы AIRS (спутник AQUA). Подготовлена глобальная карта приращений толщины эффективного слоя влаги за весь период работы тандема спутников GRACE. По результатам анализа этой карты выделены 12 регионов для более детального изучения характера и причин изменения толщины эффективного слоя влажности. За период исследования особенно ярко проявились изменения, связанные с дегляциацией покровных ледников Антарктиды, Гренландии, архипелагов северных морей. Рассмотрены проявления засухи и ее последствий в бассейне Волги и на Ближнем Востоке. На примере аномально высокого подъема уровня воды в нижнем течении реки Амур показаны возможности метода при прогнозировании паводков. Анализ многолетних вариаций поля силы тяжести Земли позволил сделать вывод о значимом влиянии техногенного фактора на снижение уровня озера Байкал. В результате исследований показано, что спутниковые измерения вариаций поля силы тяжести Земли позволяют проводить мониторинг гидрологического режима регионов и на этой основе прогнозировать природные явления, влияющие на уровень экологической безопасности населения.

Ключевые слова: спутник, GRACE, сила тяжести, вариации, влагосодержание, глобальные тенденции, криолитозона, засуха, паводок, прогноз, урожай, саранчовые

Одобрена к печати: 15.11.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28

Введение

Тандем спутников GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) был выведен на орбиту в 2002 г. и продолжает с ограничениями работать по настоящее время. Проект GRACE направлен на глобальное картографирование и мониторинг пространственно-временных вариаций гравитационного поля Земли (ГПЗ) на уровне орбиты (Tapley et al., 2004). Материалы съемок системой GRACE показали высокую перспективность этого нового спутникового метода для решения гидрологических задач (Khan et al., 2013), задач гляциологии (Jacob et al., 2012; Moholdt et al., 2012; Velicogna et al., 2014). Была показана значимая статистическая связь между ГПЗ и продуктивной влажностью почв (Киселев и др., 2015), что открыло возможность применения этого метода в сельском хозяйстве.

Ежемесячно за весь тринадцатилетний период эксплуатации спутников GRACE с геометрическим разрешением ~ 110x110 км построены глобальные карты вариаций ГПЗ, пересчитанные в толщину эффективного слоя влажности (ТЭСВ). Объёмные архивы глобальных карт ТЭСВ, накопленные за последние 14 лет открыли возможность для анализа многолетних тенденций изменения ТЭСВ, связанных с опасными природными явлениями, влияющими на экологическую безопасность населения: наводнениями, засухами, вспышками численности сельскохозяйственных вредителей. Поэтому целью настоящей статьи является доказательство эффективности применения спутникового мониторинга вариаций

ГПЗ при решении задач экологической безопасности и привлечение внимания космической отрасли России к этому методу наблюдений Земли из космоса.

1. Материалы и методы

1.1. Характеристики материалов съемки спутниками GRACE

Орбитальная система GRACE представляет собой тандем из двух идентичных спутников, находящихся на околополярной орбите на высоте 300–500 км на расстоянии 220 км друг от друга (Tapley et al., 2004). Спутниковая система в квазинепрерывном режиме измеряет расстояние между аппаратами, которое зависит от сил земного притяжения. Это позволяет пересчитывать относительные изменения координат в значения ГПЗ. В результате с месячным интервалом строятся глобальные карты ТЭСВ.

Вариации (изменения) ГПЗ вызываются как астрономическими факторами (притяжением небесных тел), влияние которых учитывается специальными поправками, так и динамическими процессами, приводящими к изменению масс в литосфере, атмосфере, океане. При этом за время функционирования системы GRACE вариации ГПЗ отражали в основном изменения массы воды в атмосфере, океане и верхней части литосферы. Исключение составляют катастрофическое землетрясение в Индонезии, приведшее к заметному смещению литосферных плит (Panet et al., 2010), и послеледниковое поднятие Балтийского щита (Steffen et al., 2009).

Стандартным продуктом съемки системой GRACE являются карты отклонений ТЭСВ от среднего за период 2002–2015 гг. уровня, которые строятся с геометрическим разрешением в один угловой градус, т.е. характерный размер элементарной ячейки в экваториальной зоне близок к 111 км. Среднеквадратическая погрешность картографирования ТЭСВ по результатам месячного цикла измерений в зависимости от широты исследуемого региона, а также региональных климатичеких факторов и объёма выпавших осадков составляет менее 2,0 см (Swenson, Wahr, 2006; Landerer, Swenson, 2012; Swenson, 2012).

1.2. Методика обработки материалов съемок системой GRACE

Для анализа особенностей отражения опасных природных явлений в вариациях ГПЗ использовались следующие предварительные обработки ТЭСВ:

– с использованием данных спутникового инфракрасного зондировщика атмосферы AIRS, установленном на спутнике AQUA (AIRS Science…, 2013), выполнялась поправка ТЭСВ на содержание влаги в атмосфере (Киселев и др., 2015);

– по всем ежемесячным картам каждого года за период с 2002 г. по 2015 г. в каждом пикселе итоговой цифровой карты находился линейный тренд ТЭСВ и строилась карта приращений ТЭСВ в сантиметрах за период с 2002 г. по 2015 г. (*рис. 1*). Выполнялось цве-

товое кодирование карты. При этом положительные приращения ТЭСВ (синий цвет на карте) указывали на рост влагообеспеченности территории, а отрицательные (красный цвет) на ее понижение;

– выполнялся визуальный анализ карты с выделением областей, в пределах которых наблюдались значительные многолетние изменения ТЭСВ;

– для каждой из таких областей за период 2002–2015 гг. строились помесячные графики изменения ТЭСВ, рассчитывалась осредненные значения, выполнялись их кросс-корреляции ТЭСВ с временными рядами метеорологических и гидрологических характеристик.

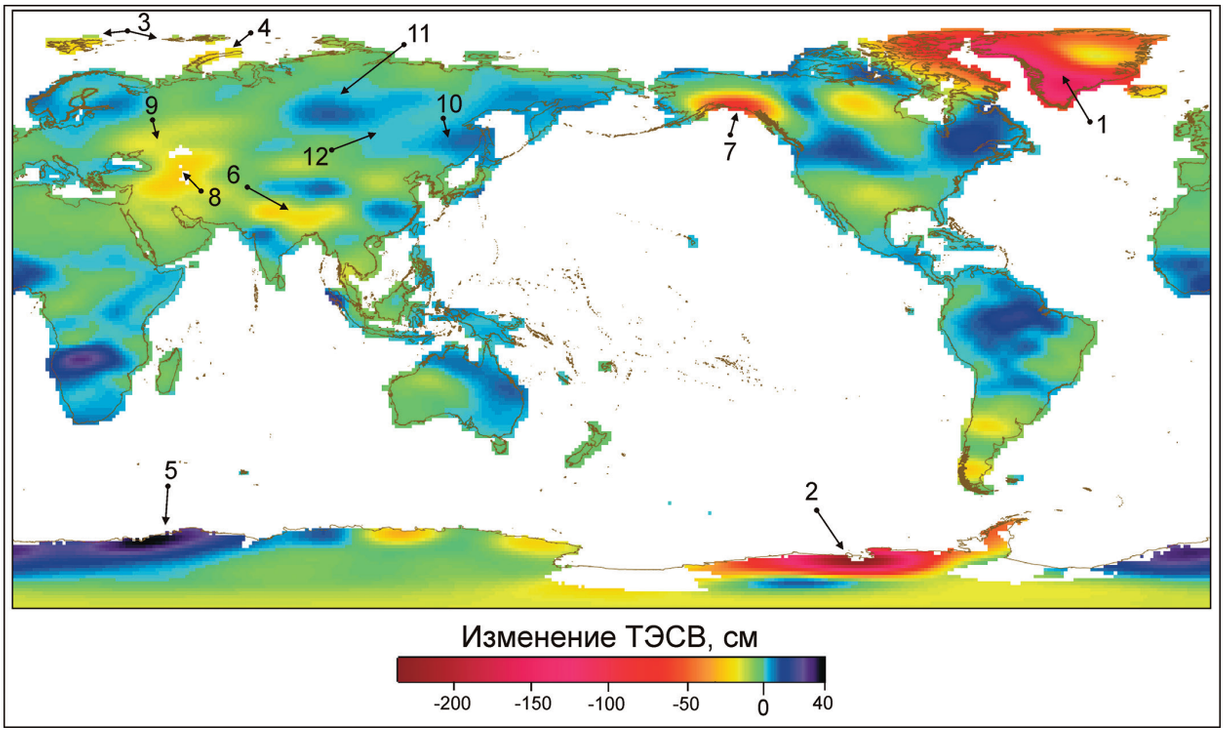

Рис. 1. Карта тенденций изменения ТЭСВ за период с 2002 г. по 2015 г.

2. Результаты

При анализе карты многолетней тенденции изменения ТЭСВ (*рис. 1*) обращает внимание чрезвычайно значительные снижения ТЭСВ (до -150 см) в южной части ледникового покрова Гренландии (1 на *рис. 1*) и Антарктиды (до -240 см) (2 на *рис. 1*). Несколько меньшие снижения ТЭСВ отмечены в пределах архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (3 на *рис. 1*), Новая Земля (4 на *рис. 1*). В то же время в Антарктиде, в районе Земли Эндерби и Земли Кемпа (5 на *рис. 1*), наблюдается обратная тенденция, т.е. за последние 13 лет ТЭСВ повысилось более чем на +40 см. В Азии полуостров Индостан ограничивается с северо-востока зоной постоянного снижения ТЭСВ (6 на *рис. 1*). Обращает внимание существенное понижение ТЭСВ на юге Аляски, достигающее -70 см (7 на *рис. 1*).

На суше, свободной от ледников, зарегистрированы менее интенсивные многолетние тенденции изменения ТЭСВ обоих знаков. Первый включает в себя Прикаспийский регион и Ближний Восток (8 на *рис. 1*). Отмечаются и менее интенсивные изменения ТЭСВ. Так, на юго-востоке Европейской части России расположена обширная область понижения ТЭСВ (9 на *рис. 1*). Имеются области значительного прироста ТЭСВ: на Дальнем Востоке (10 на *рис. 1*); в Якутии (11 на *рис. 1*). Представляет интерес вытянутая к северо-востоку область малых изменений ТЭСВ, расположенная между Дальневосточным и Восточно-Сибирским максимумами прироста ТЭСВ (12 на *рис. 1*).

3. Обсуждение результатов

3.1. Динамика криосферы

Наши результаты по применению материалов съемок системой GRACE для изучения ледников не являются новыми. Ранее этот спутниковый метод был использован в рамках проблемы влияния деградации ледников на уровень мирового океана (Jacob et al., 2012; Moholdt et al., 2012; Velicogna et al., 2014). Тем не менее сравнение с ранее проведенными исследованиями позволяет:

- оценить надежность наших методик обработки материалов съемки спутников GRACE, которые в дальнейшем использованы для решения других задач;
- сравнить результаты, полученные ранее на коротком временном отрезке с нашими результатами, в которых использованы материалы съемок за весь период функционирования системы GRACE.

Наиболее яркая картина по тенденциям изменений ТЭСВ наблюдается в пределах ледников Антарктиды (Обобщающий доклад…, 2007) на Земле Элсуорта и Земле Мэри Бэрд и на Антарктическом полуострове (2 на *рис. 1*). Так, по результатам измерений радиолокационным альтиметром, установленным на европейском спутнике CryoSat-2, в прибрежной области Земли Элсуорта (2 на *рис. 1*) скорость понижения поверхности ледника составляет -32,7 ÷ -36,2 см/год (*табл. 1*). В то же время, скорость снижения ТЭСВ по данным системы GRACE в пересчете на толщину льда за период с 2002 г. по 2015 г. составляла ~ -20 см/год, что по порядку величин совпадает со значениями, полученными спутником CryoSat-2. Необходимо отметить, что к востоку от Антарктического полуострова (Земля Котса) по данным CryoSat-2 наблюдается подъем поверхности ледника (рост массы ледника), составляющий +2,3 см/год ÷ +13,5 см/год (*табл. 1*). Это также не противоречит результатам, полученным системой GRACE (*рис. 1*), которая зарегистрировала скорость роста ТЭСВ, пересчитанную на толщину слоя льда в +3,3 см/год. Материалы съемки системы GRACE характеризуются значительно худшим геометрическим разрешением, чем альтиметр CryoSat-2. В результате происходит усреднение по большой площади. Поэтому результаты GRACE, как правило, либо лежат внутри, либо ниже интервала значений, получаемых системой высокого разрешения.

Таблица 1. Современные скорости изменения высоты подстилающей поверхности на территории криосферы

Регион	***Район***	***По данным GRACE, 200–2015 гг. см/год***	***По данным других исследований***	
			Скорость, см/год	***Источник***
Западная Антарктида	Земля Элсуорта	-20,0	-16	GRACE, 2003–2013 гг. Velicogna et al., 2014
			-32,7 ÷ -36,2	Альтиметр CryoSat-2, McMillan et al., 2014
Восточная Антарктида	Земля Котса	+3,3	+2,3 ÷ +13,5	Альтиметр CryoSat-2, McMillan et al., 2014
Гренландия	Южная часть	-13,0	До -50,0 в краевых частях ледника	Solomon et al., 2007
			-16	GRACE, 2003–2013 гг. Velicogna et al., 2014
Арктика	Шпицберген	-0,7÷-1,8	-	ICESat, лазерный альтиметр 2003–2009 гг. Moholdt et al., 2012
	Земля Франца-Иосифа	-0,7÷-1,4	-8±7	
	Новая Земля	-0,3÷-1,8	-38±6	
Субарктика	Аляска	0÷-5,9	0 ÷-24,0	GRACE, Arendt, 2016
			0 ÷-350	ICESat, лазерный альтиметр 2003–2009 гг. Arendt et al., 2008
			-4 ÷ -5	GRACE Chen et al., 2006

В Гренландии же снижение ТЭСВ наблюдается уже по всей площади ледника (1 на *рис. 1*), где в южной его части по данным GRACE (*табл. 1*) в пересчете на плотность льда скорость дегляциации достигает ~ -13 см/год, что не противоречит другим результатам *(табл. 1*), полученным в краевых частях ледника (Climate Change…, 2007).

В пределах архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген снижение ТЭСВ также того же порядка, что было получено ранее лазерным альтиметром, установленным на спутнике ICESat (*табл. 1*). Меньшие по сравнению с лазерной альтиметрией значения, полученные нами на Новой Земле (ширина островов ~ 100 км) могут быть вызваны низким геометрическим разрешением системы GRACE (*табл. 1*), т.к. пиксели карты ТЭСВ могут не точно располагаться целиком в пределах покровного ледника, но и захватывать значительную часть морской акватории.

Упомянутая выше зона снижения ТЭСВ, ограничивающая полуостров Индостан с северо-востока (6 на *рис. 1*), как это отмечено в (Jacob et. al, 2012), вызвана деградацией уже не покровных, а горных ледников Гималаев.

Интересным моментом является существенное понижение ТЭСВ в пределах юга Аляски (7 на *рис. 1*, *табл. 1*). В этом регионе максимальное снижение ТЭСВ отмечаются в районе ледников горы Маунт Логан. На этих ледниках, по данным съемки лазерным

альтиметром спутника ICESat, скорости опускания поверхности превышают 350 см/год (Arendt et al., 2008). На той части Аляски, где ледники отсутствуют также отмечается высокие (0 ÷ -24 см/год (*табл. 1*)) скорости понижения ТЭСВ, что указывает на возможное повышение глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых пород из-за наблюдающегося потепления (Climate Change…, 2007). При этом талые воды скатываются в океан. В результате возникает дефицит масс, и в таких местах следует ожидать постоянную тенденцию к снижению ГПЗ, что и зарегистрировано системой как в первые же годы после запуса системы GRACE (Chen et al., 2006), так и нами в течение последних 13 лет (*рис. 1*, *табл. 1*).

Анализ глобальной карты тенденций в изменении ТЭСВ позволяет сделать следующие выводы:

1. Наша методика обработки материалов спутника GRACE дала результаты близкие к опубликованным в научной литературе. Это позволяет применить данную методику для анализа менее контрастных природных явлений, например, засух, наводнений.

2. Наличие устойчивой тенденции к понижению ТЭСВ, отмеченное в пределах южной Аляски указывает на перспективность изучения изменений ГПЗ, связанных с деградацией многолетней мерзлоты под действием глобального потепления.

3.2. Опасные природные явления, вызванные изменениями гидрологического режима водосборных бассейнов

3.2.1. Осложнение судоходства на Верхней Волге

В последние годы на верхней Волге ухудшились условия для судоходства. Для выяснения характера причин этого явления (природные или техногенные) был выполнен анализ результатов съемки спутниками GRACE по водосборному бассейну Верхней Волги (7 на *рис. 1*), расположенному выше Чебоксарского водохранилища (*рис. 2*). Площадь этого бассейна составляет около 1273 тыс. км^2 (более 100 пикселей карты ТЭСВ). Для этого бассейна рассчитаны усреднённые по площади данные спутниковой гравиметрии, выраженные в сантиметрах ТЭСВ (см. *рис. 3*).

Наблюдения за динамикой ТЭСВ показали, что с 2002 г. по 2015 г. происходило постоянное снижение влагозапаса в бассейне Верхней Волги (см. кривую 3 на *рис. 3*). Более того, в пределах бассейна в 2014 г. произошло дальнейшее резкое снижение влагозапаса, вызванное бесснежной зимой 2013–2014 годов (см. 3 на *рис. 3*), что, несомненно, должно было привести к понижению уровня воды в реках и водохранилищах.

Объём «недостающей» в бассейне воды в 980 км^3 оценен как снижение в июле–августе 2015 г. ТЭСВ = -7,7 см по сравнению с тем же периодом 2014 г., умноженное на площадь водосборного бассейна (1273 тыс. км^2). Для сравнения в 2013-м году через Горьковское водохранилище пропущено 63 км^3 воды, а в 2014-м – 36 км^3. Полный объём всего Рыбинского водохранилища (крупнейшего на Верхней Волге) составляет 25,4 км^3, а суммарный полный объём всех Верхневолжских водохранилищ (Рыбинское, Угличское, Чебоксарское и Горьковское) – 40 км^3. Таким образом, в 2015 г. дефицит влагозапаса в Верхневолжском

водосборном бассейне почти в 25 раз превосходил объём всех Верхневолжских водохранилищ. Низкий влагозапас в Верхневолжском бассейне подтверждается и измерениями на метеостанциях. На *рис. 3* приведены среднемесячные данные измерений толщины снежного покрова на метеостанции г. Рыбинска. По данным этих измерений в зимний период 2014–2015 гг. наблюдались аномально низкие запасы снега, что должно было привести к слабому паводку и низкому уровню весеннего стока.

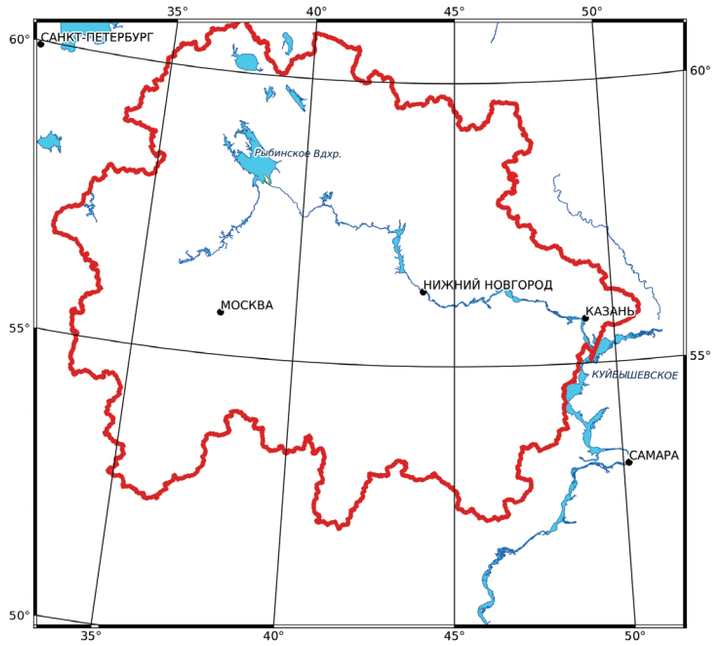

Рис. 2. Водосборный бассейн Верхней Волги, выше Чебоксарского водохранилища (граница бассейна показана красной линией)

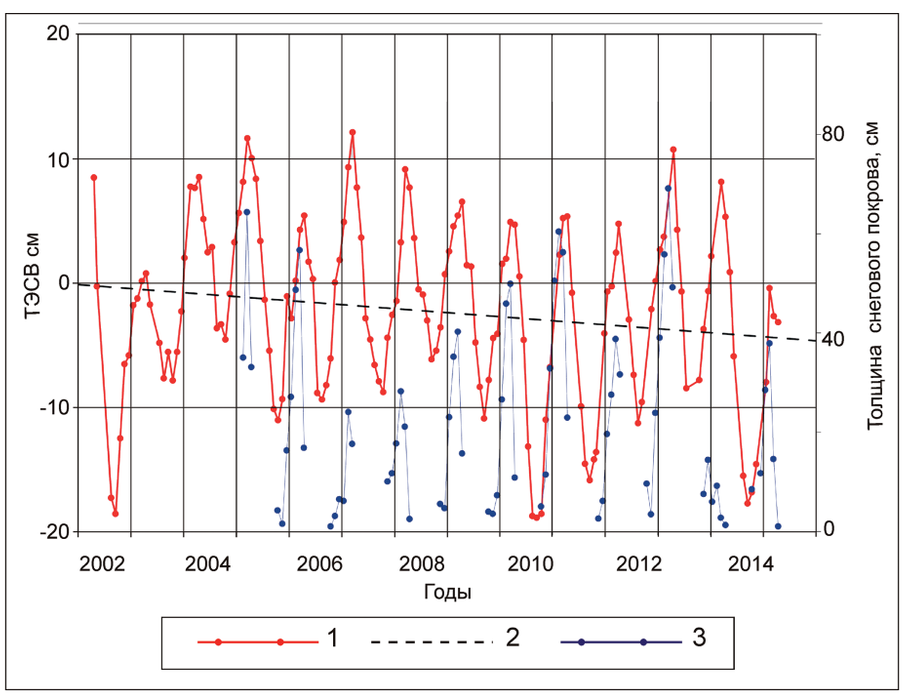

Рис. 3. Динамика гидрологических характеристик, усредненных по площади бассейна Верхней Волги. Условные обозначения: 1 – ТЭСВ по результатам съемки системой GRACE; 2 – линейный тренд ТЭСВ; 3 – толщина снегового покрова по данным наблюдений на метеостанции г. Рыбинска

Из приведённых результатов следует вывод, что маловодье 2015 года в основном вызвано не техногенными, а природными факторами – низким снегонакоплением на фоне многолетней тенденции снижения запасов влаги в Верхневолжском водосборном бассейне.

3.2.2. Вспышка численности саранчовых 2009 г. в Европейской части России

Экологически опасным следствием снижения влагозапаса в почве является вспышка численности итальянского пруса (*Calliptamus italicus*) на Средней и Нижней Волге в 2009 г. (Тронин и др., 2014). При обычной для средней полосы России влажности почвы значительное количество отложенных в почву яиц итальянского пруса поражается плесенью. В засушливые же годы влажность почвы осенью и весной низкая. В результате губительное воздействие плесени снижается, и из большинства отложенных яиц отрождаются личинки саранчовых. Если случаются два и более засушливых года подряд, то количество этих сельскохозяйственных вредителей возрастает драматически, т.е. наблюдается вспышка их численности.

Для изучения этого явления нами был предложен комплексный индекс, представляющий собой ТЭСВ, делённую на среднемесячную дневную температуру почвы (по данным съемки спутником Aqua(MODIS), – некий аналог гидротермического коэффициента (Тронин и др., 2014). В период нахождения яиц итальянского пруса в почве (осень–весна) наибольшее значение этого индекса указывает на высокое увлажнение почвы. В результате в 2009 г. в районах, характеризовавшихся высокими значениями комплексного индекса, вспышек численности итальянского пруса отмечено не было, а в районах с минимальным значением комплексного индекса отмечена высокая плотность численности саранчовых (Тронин и др., 2014). Это открыло возможность прогнозирования вспышек численности итальянского пруса в условиях юга Европейской части России на основе комплексирования материалов спутниковой съемки вариаций ГПЗ и космической тепловой съемки.

3.2.3. Засуха на Ближнем Востоке

Тенденции к снижению ТЭСВ, отмеченные выше для бассейна Верхней Волги, территориально связаны с более интенсивным многолетним снижением ТЭСВ, отмеченным на Ближнем Востоке (8 на *рис. 1*). Рекордная засуха в Сирии, Турции и Ираке произошла в период 2006–2010 годов (Kelley et al., 2015). Для изучения ситуации были рассчитаны усредненные по площади Сирии значения ТЭСВ (*рис. 4, 5*).

Ретроспективный анализ результатов съемки системой GRACE показал, что с 2004 г. по 2006 г. в летнюю межень наблюдалось постепенное снижение ТЭСВ до уровня ниже -10 см (август). После этого ТЭСВ до 2013 г. держался на этом низком уровне. В 2012–2013 гг. количество осадков на территории Сирии превысило средний многолетний уровень (*рис. 5Б*), но при этом ТЭСВ не повысился. Зимой 2013–2014 гг. снова выпало чрезвы-

чайно малое количество осадков (*рис. 5Б*), и ТЭСВ еще понизился до максимально низкого за весь период наблюдений уровня – ниже -15 см. Низкие значения ТЭСВ, наблюдавшиеся на территории Сирии с 2009 г. по 2015 г., при одновременном достаточно высоком уровне осадков (*рис. 5Б*) указывают на антропогенную природу этого явления. Причиной снижения влагозапаса территории Сирии является напряженная демографическая ситуация в аграрных районах Сирии, отбор ирригационными системами Турции стоков рек Евфрат и Тигр, хищническое использование для орошения хлопковых полей запасов подземных вод, извлекаемых многочисленными скважинами (Kelley et al., 2015).

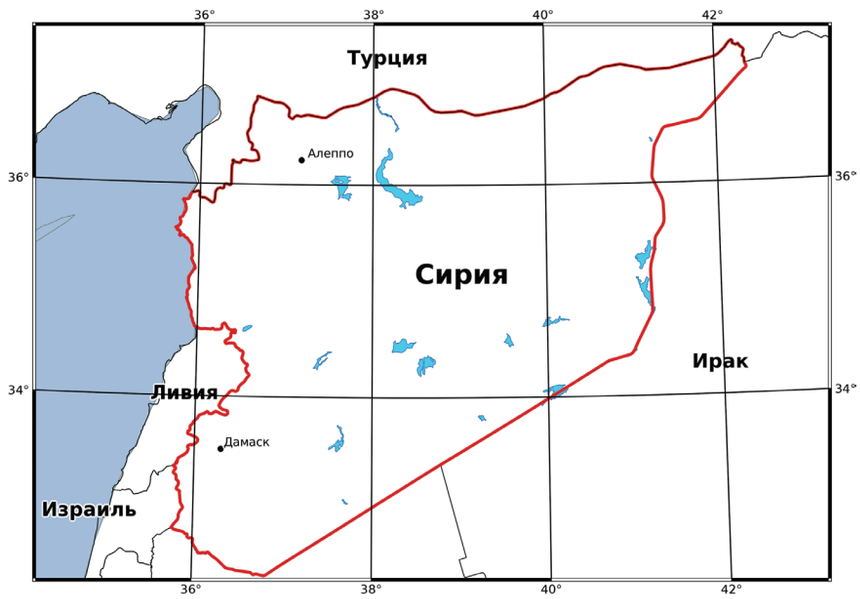

Рис. 4. Территория Сирии, в пределах которой рассчитывался ТЭСВ (граница Сирии показана красной линией)

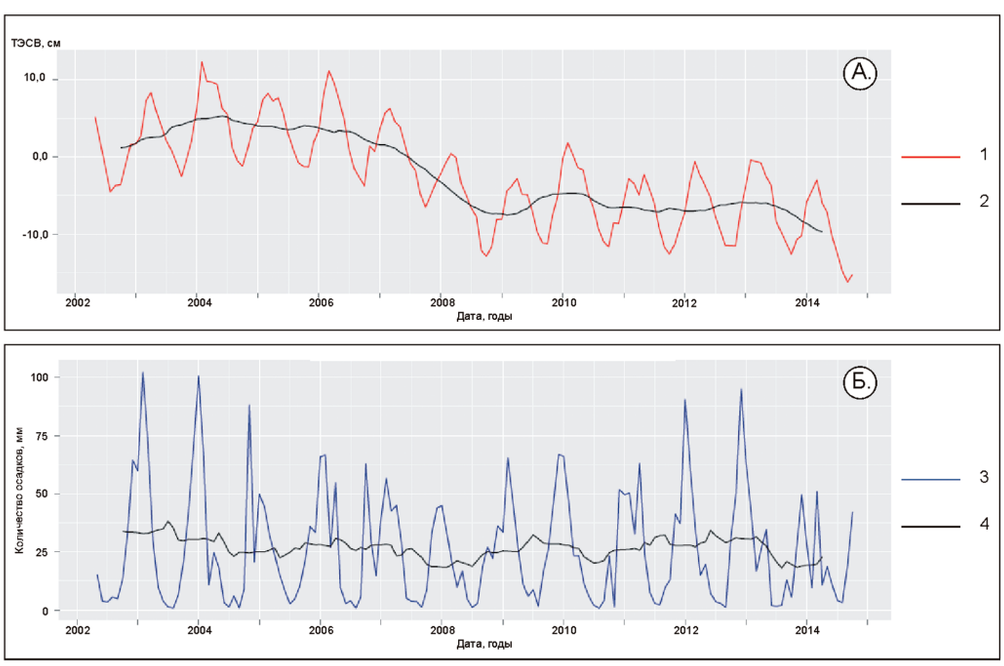

Рис. 5. Динамика гидрологических характеристик, усредненных по площади Сирии. А) ТЭСВ: 1 – среднемесячная; 2 – сглаженная в скользящем окне 12 мес. Б) Количество осадков: 3 – среднемесячное; 4 – сглаженное в скользящем окне 12 мес.

3.2.4. Понижение уровня озера Байкал

Начиная с 2013 г. наблюдается снижение уровня воды в озере Байкал (Байкальское…, 2015). В литературе обсуждаются две основные причины этого явления: природная – снижение осадков в пределах водосборного бассейна озера; техногенная – сверхнормативное использование воды озера Байкал гидроэлектростанциями Ангары.

Анализ карты тенденций изменений ТЭСВ показывает наличие в месте расположения озера Байкал некоторой седловины (12 на *рис. 1*) между двумя региональными максимумами роста ТЭСВ (10, 11 на *рис. 1*). Седловина указывает на то, что за последние 13 лет не наблюдается постоянных тенденций в изменении влагозапаса региона. Для всего водосборного бассейна озера Байкал (*рис. 6*) были подготовлены многолетние временные ряды характеристик, отражающих гидрологический режим всего бассейна (*рис. 7*).

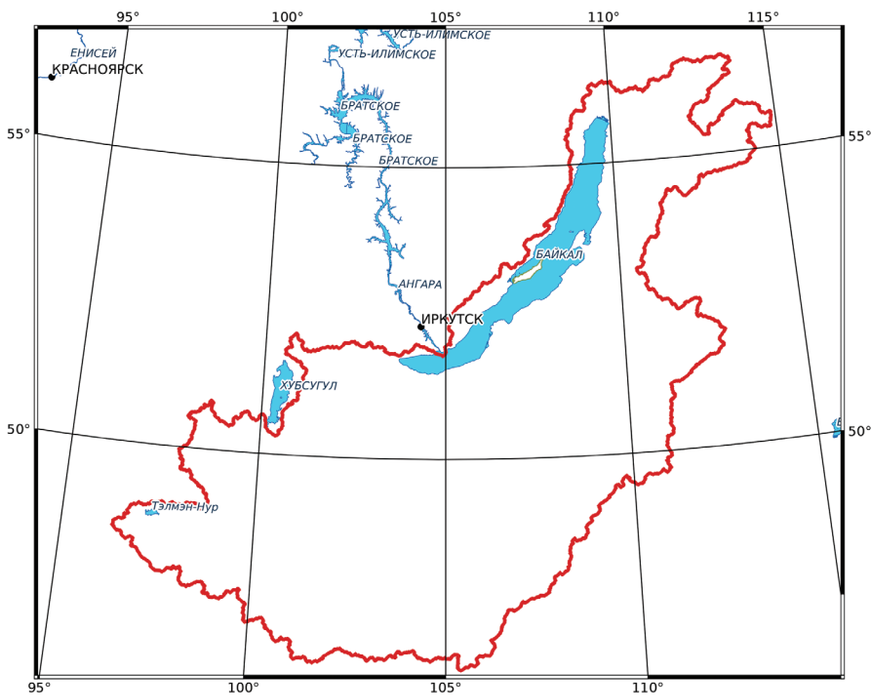

Рис. 6. Водосборный бассейн озера Байкал (граница бассейна показана красной линией)

Анализ динамики ТЭСВ, усредненного по площади всего водосборного бассейна озера, показывает резкое снижение ТЭСВ, начиная с января 2014 г. В августе этого года ТЭСВ снизился до -4,5 см (1 на *рис. 7А*). Летняя межень совпала с малым количеством осадков (63 мм), выпавшим в июне (3 на *рис. 7В*).

Аналогичное явление прослеживается по ретроспективным данным ТЭСВ в 2002 г. (1 на *рис. 7А*, 3 на *рис. 7В*), когда в июне 2002 г. по данным спутниковых наблюдений выпало менее 60 мм (*рис. 7В*). После этого в июле среднее по водосборному бассейну значение ТЭСВ упало до уровня -6 см. Зимой 2002–2003 гг. также наблюдалось меньшее чем обычно количество осадков, что, видимо, усугубило ситуацию с влагосодержанием в водосборном бассейне. В 2003 г. максимум осадков пришелся на июнь, и в этом же месяце был отмечен

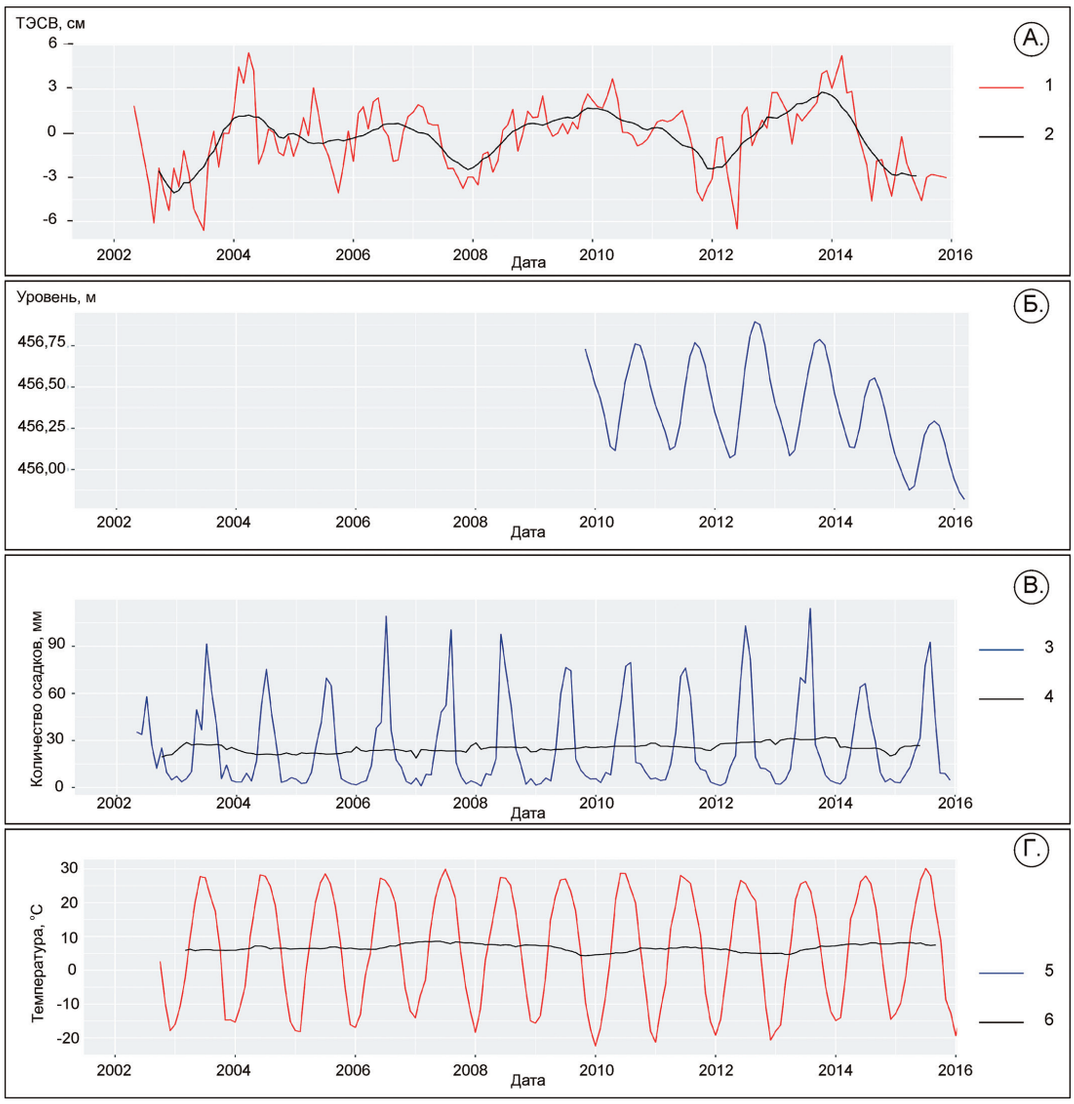

Рис. 7. Динамика гидрологических характеристик, усредненных по всей площади водосборного бассейна озера Байкал: А) ТЭСВ: 1 – ежемесячные данные; 2 – сглаженные данные в скользящем окне 12 мес. Б) Уровень воды в озере Байкал по данным уровнемерных наблюдений. В) Количество осадков по данным измерений спутниковой системой TRMM: 3 – среднемесячное; 4 – сглаженное в скользящем окне 12 мес. Г) Средняя по водосборному бассейну дневная температура земной поверхности: 5 – среднемесячная; 6 – В скользящем окне 12 мес.

абсолютный минимум ТЭСВ -6,3 см, что, возможно, вызвано естественным запаздыванием поступления метеорных вод с площади водосбора в озеро. Как следует из результатов съемки системой GRACE, после снижения количества осадков в 2014 г. (*рис. 7В*) в 2015 г., также как и в 2003 г., наблюдалось резкое падение ТЭСВ. (*рис. 7Б*). В связи с тем, что в 2015 г. количество осадков на площади бассейна озера вышло на средний уровень, по аналогии с периодом 2002–2003 гг. в 2016 г. следовало ожидать снова подъем уровня озера. Тем не менее падение ТЭСВ, также как и уровня воды в озере Байкал, продолжилось и в 2016 г. (*рис. 7А, Б*). Для анализа причин такого явления необходимо отметить, что в 2013 г. (год начала снижения уровня озера) на территории водосборного бассейна наблюдалось максимальное за последние 13 лет количество осадков (*рис. 7В*), а температура дневной поверхности была минимальной за весь этот период (*рис. 7Г*). Известно, что главными со-

ставляющими водного баланса водосборного бассейна являются осадки, поверхностный и подземный сток, испарение с земной поверхности. В свою очередь, увлажнение поверхности в значительной степени определяет дневную температуру земной поверхности и, соответственно, интенсивность испарения. Поэтому, если, как следует из результатов наблюдений (*рис. 7Г*), за период понижения уровня озера (2013–2016 гг.) температура поверхности менялась крайне незначительно, то не следует говорить об избыточном испарении с поверхности водосборного бассейна в этот период. Таким образом, техногенный фактор остается единственным, ответственным за современное снижение уровня озера Байкал.

3.2.5. Паводок 2013 г. в долине реки Амур

Анализ глобальных многолетних тенденций в изменении ТЭСВ показывает, что в Дальневосточном регионе России отмечается значительное повышение этой характеристики (8 на *рис. 1*). В начале сентября 2013 г. районы среднего и нижнего течения реки Амур оказались подвержены одному из сильнейших дождевых паводков за весь период инструментальных наблюдений. Практически повсеместно в пределах водосборного бассейна реки Амур (*рис. 8*) отмечены рекордные уровни воды на 1,5–2 метра превосходящие исторические максимумы (Махинов и др., 2014). Анализ многолетнего ряда ТЭСВ (*рис. 9А*) показал, что наблюдаются циклы продолжительностью 4–5 лет, включающие периоды повышения и понижения влагосодержания в бассейне Амура. При этом в течение предпоследнего цикла (2008–2012 гг.) зарегистрировано как повышение, по сравнению с предыдущим циклом, среднегодовых значений ТЭСВ (2 на *рис. 9А*), так и возрастание среднегодового количества осадков (4 на *рис. 9Б*). Во время последнего такого цикла, начавшегося в 2012 г., выпало несколько большее, чем обычно годовое количество осадков (4 на *рис. 9Б*). Возможно, поэтому в последнем цикле значительно повысилась ТЭСВ, достигнув почти максимума весной 2013 г. Такое повышение ТЭСВ должно соответствовать подъему уровня грунтовых вод и росту влажности зоны аэрации. В этой ситуации летом 2013 года выпало максимальное за весь исследуемый период (с 2002 г.) количество осадков. В результате инфильтрация осадков в почву была минимальной, и основная доля интенсивных осадков по поверхности рельефа дневной поверхности быстро скатилась в долину реки Амур, что и привело к рекордному подъему уровня реки.

Таким образом, паводок 2013 г. в низовье реки Амур вызван сочетанием роста среднегодового количества осадков, приведшего к возрастанию влагозапаса в водосборном бассейне реки к началу лета 2013 г. (см. *рис. 9А*) и чрезвычайно высоких норм осадков, выпавших в середине лета 2013 г. (см. *рис. 9Б*).

Полученные на примере паводка на реке Амур результаты показывают, что мониторинг вариаций ГПЗ открывает возможность прогнозирования риска паводка. Например, аномально высокие значения ТЭСВ уже в начале 2013 г. указывали на высокий риск паводка.

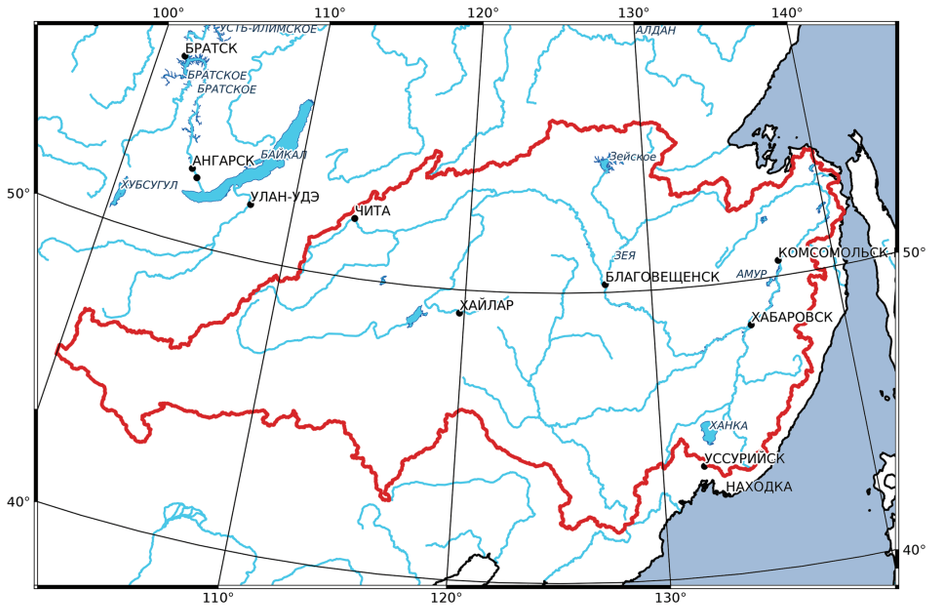

Рис. 8. Водосборный бассейн реки Амур (граница бассейна показана красной линией)

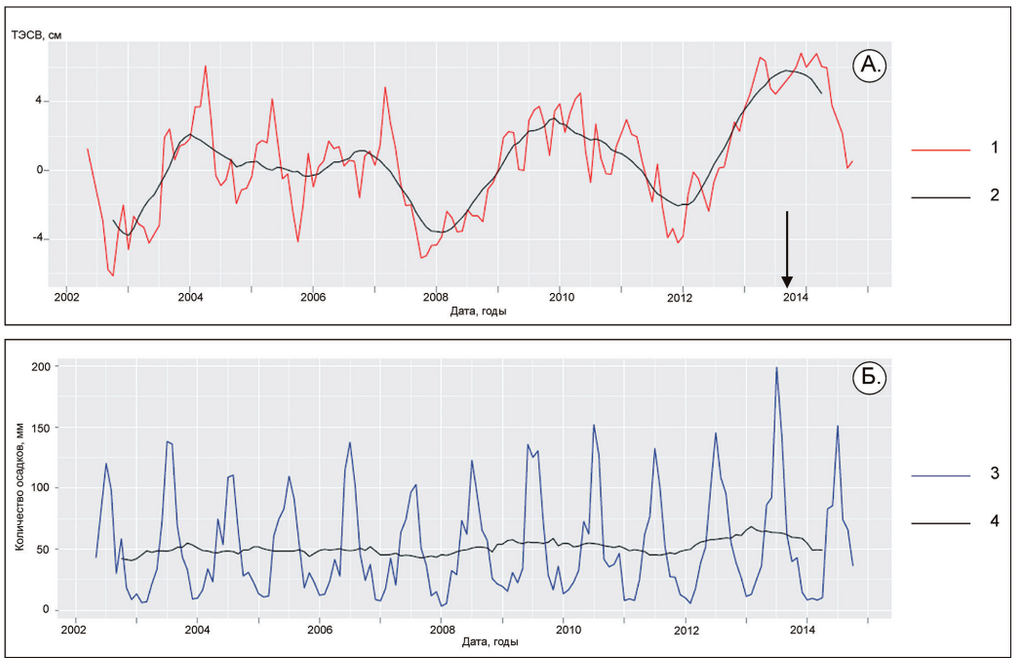

Рис. 9. Динамика гидрологических характеристик, усредненных для всей площади водосборного бассейна реки Амур. А) ТЭСВ (стрелкой показано время максимального уровня воды в р. Амур): 1 – ежемесячные данные; 2 – сглаженные в скользящем окне 12 мес. Б) Количество осадков по данным наблюдений на метеостанциях (Данные метеорологических..., 2015); 3 – среднемесячное; 4 – сглаженное в скользящем окне 12 мес.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Высокая чувствительность вариаций ГПЗ к процессам дегляциации указывает на перспективность изучения реакции ГПЗ на деградацию многолетней мерзлоты под действием глобального потепления.

2. Многолетний спутниковый мониторинг вариаций ГПЗ открывает возможность для прогнозирования опасных природных явлений (засухи и паводки), влияющих на уровень экологической безопасности населения. Также показана перспективность этого спутникового метода для прогнозирования таких последствий засух как вспышки численности саранчовых, ухудшение условий речного судоходства.

3. Представленные результаты продемонстрировали возможности эффективного применения спутниковых измерений вариаций ГПЗ при решении задач экологической и экономической безопасности. Поэтому необходимо обратить внимание космической отрасли на то, что в новой Государственной программе Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы» не предусмотрена разработка и запуск спутников, предназначенных для высокоточного мониторинга вариаций ГПЗ, что может привести к отставанию практического применения в народном хозяйстве России этого нового направления.

Литература

1. Байкальское маловодье. 21.01.2015. URL: http://blog.rushydro.ru/?p=9782.
2. *Киселев А.В., Муратова Н.Р., Горный В.И., Тронин А.А.* Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 43–52.
3. *Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А.* Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 5−14.
4. Обобщающий доклад «Изменение климата, 2007 г.». Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Ред. Пачаури Р.К., Райзингер Э. МГЭИК, 2007. Женева, Швейцария. 104 с. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf.
5. *Тронин А.А., Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш.* Прогнозирование вспышек саранчовых на основе материалов спутниковых съемок. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 137−150.
6. AIRS Science Team/Joao Texeira, 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), 2013. DOI: 10.5067/AQUA/AIRS/DATA319.
7. *Arendt A.A., Luthcke S.B., Larsen C.F., Abdalati W., Krabill W.B., Beedle M.J. V*alidation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry // Journal of Glaciology. 2008. Vol. 54, No. 188. P. 778-787.
8. *Chen J.L., Tapley B.D., Wilson C.R.* Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry // Earth and Planetary Science Letters. V. 248. Issues 1–2. 2006. P. 368−378. ISSN 0012-821X. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039.
9. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. 2007. 18 p.
10. *Jacob T., Wahr J., Pfeffer W.T., Swenson S.* Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise // Nature. 482. P. 514–518.
11. *Kelley C.P., Mohtadi S., Cane M.A., Seager R., Kushnir Y.* Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 17 March 2015. V. 112. No. 11. P. 3241–3246. DOI: 10.1073/pnas.1421533112. Url: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1421533112.
12. *Khan H.H., Khan A., Shakeel A., Gennero M.-C., Minh K.D., Cazenave A*. Terrestrial water dynamics in the lower Ganges—estimates from ENVISAT and GRACE // Arabian Journal of Geosciences. 2013. Vol. 6. No. 10. P. 3693−3702.
13. *Landerer F.W., Swenson S.C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. V. 48. W04531. P. 11. DOI: 10.1029/2011WR011453.
14. *McMillan M., Shepherd A., Sundal A., Briggs K., Muir A., Ridout A., Hogg A., Wingham D.* Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2 // Geophys. Res. Lett. 2014. 41. P. 3899–3905.

15. *Moholdt G., Wouters B., Gardner A.S.* Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic // Geophysical Reserarch Letters. 2012. V. 39. L10502, 5. P. 1−5.
16. *Panet I., Pollitz F., Mikhailov V., Diament M., Banerjee P., Grijalva K. Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake // Geochem. Geophys. Geosyst. 2010. V. 11. No. 6. Q06008. DOI: 10.1029/2009GC002905.*
17. *Steffen H., Gitlein O., Denker H., Müller J., Timmen L.* Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry // Tectonophysics. 2009. V. 474. P. 69–77.
18. *Swenson S.C., Wahr J.* Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L08402. DOI: 10.1029/2005GL025285.
19. *Swenson S.C.* GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. 2012. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed 2015-06-13 at URL: http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005.
20. *Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C.* The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L09607. DOI: 10.1029/2004GL019920.
21. *Velicogna I., Sutterley T.C., van den Broeke M.R.* Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. P. 8130–8137.

Indication of natural hazards using terrestrial gravity field variations observed by GRACE system

A.V. Kiselev, V.I. Gornyy, S.G. Kritsuk, A.A. Tronin

SRCES RAS, St. Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The paper discusses practical applications of terrestrial gravity field oscillations measured with the GRACE satellite system during a period of 13 years. The GRACE data are corrected for the impact of atmospheric water vapor content to remove a random atmospheric factor for which purpose AIRS (infrared atmospheric sounder of the AQUA satellite) data were used. A global map of the effective water layer thickness (EWLT) increment over the 13-year period was built. It was used to choose 12 regions for detailed study of the EWLT oscillations. Dramatic changes were found in the glacial cover of Antarctica, Greenland, and Arctic Archipelagos. The drought manifestations and their consequences within the basin of the Volga River and the Nearest East region are also discussed. It was shown on example of the anomalous water level rising of the Amur River in 2013 that the EWLT variations could be used for flood prognosis. Analysis of terrestrial gravity field oscillations led to a conclusion on the significance of the technogenic factor for the critical continuous declining of the Baikal Lake water level. We demonstrated that satellite observations of terrestrial gravity force oscillations provide a means to monitor regional hydrological regime and predict natural hazards.

Keywords: satellite, GRACE, gravity force, variations, terrestrial water storage changes, global tendency, cryosphere, drought, flooding, forecast, harvest, locust

Accepted: 15.11.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28

References

1. http://blog.rushydro.ru/?p=9782.
2. Kiselev A.V., Muratova N.R., Gornyy V.I., Tronin A.A., Svyaz' zapasov produktivnoi vlagi v pochve s polem sily tyazhesti Zemli (po dannym s"emok sputnikami GRACE) (Relation Between Available Water Content in Soil and Gravity force (According GRACE Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 43–52.
3. Makhinov A.N., Kim V.I., Voronov B.A., Navodnenie v basseine Amura 2013 goda: prichiny i posledstviya (Flooding in the Amur River basin in 2013: Causes and Consequences), *Vestnik DVO RAN*, 2014, No. 2, pp. 5−14.
4. *Obobshchayushchii doklad "Izmenenie klimata. 2007 g.", Vklad rabochikh grupp I, II i III v Chetvertyi doklad ob otsenke Mezhpravitel'stvennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* (Climate Change. 2007. Summarizing Report. Working Groups I, II, and III Input into Forth Report about Estimation Intergovernmental Group of Experts in Climate Change), MGEIK, 2007, Geneva, Switzerland, 104 p., available at https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (July, 2016).
5. Tronin A.A., Gorny V.I., Kiselev A.V., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Prognozirovanie vspyshek saranchovyh na osnove materialov sputnikovyh s'emok (Locust Palgues Forecast Using the Remote Sensing Data), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovania Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 137−150.

6. *AIRS Science Team/Joao Texeira, 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), 2013. DOI: 10.5067/AQUA/AIRS/DATA319.
7. Arendt A.A., Luthcke S.B., Larsen C.F., Abdalati W., Krabill W.B., Beedle M.J., Validation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry, *Journal of Glaciology*, 2008, Vol. 54, No. 188, pp. 778–787.
8. Chen J.L., Tapley B.D., Wilson C.R., Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 248, Issues 1–2, 15 August 2006, pp. 368−378, ISSN 0012-821X, http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039.
9. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18 p.
10. Jacob T., Wahr J., Pfeffer W.T., Swenson S., Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise, *Nature*, 482, pp. 514–518.
11. Kelley C.P., Mohtadi S., Cane M.A., Seager R., Kushnir Y., Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 17 March 2015, Vol. 112, No. 11, pp. 3241–3246. DOI: 10.1073/pnas.1421533112. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1421533112.
12. Khan H.H., Khan A., Shakeel A., Gennero M.-C., Minh K.D., Cazenave A., Terrestrial water dynamics in the lower Ganges—estimates from ENVISAT and GRACE, *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, Vol. 6, No. 10, pp. 3693−3702.
13. Landerer F.W., Swenson S.C., Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 2012, Vol. 48, W04531, p. 11. DOI: 10.1029/2011WR011453.
14. McMillan M., Shepherd A., Sundal A., Briggs K., Muir A., Ridout A., Hogg A., Wingham D., Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2, *Geophys. Res. Lett.*, 2014, Vol. 41, pp. 3899–3905.
15. Moholdt G., Wouters B., Gardner A.S., Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2012,. Vol. 39, L10502, 5, pp. 1−5.
16. Panet I., Pollitz F., Mikhailov V., Diament M., Banerjee P., Grijalva K., Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2010, Vol. 11, Q06008. DOI: 10.1029/2009GC002905.
17. Steffen H., Gitlein O., Denker H., Müller J., Timmen L., Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry, *Tectonophysics*, Vol. 474 (2009), pp. 69–77.
18. Swenson S.C., Wahr J., Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, Vol. 33, L08402. DOI: 10.1029/2005GL025285.
19. Swenson S.C., *GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0*, Ver. 5.0, 2012, PO.DAAC, CA, USA, available at http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005 (June, 2015).
20. 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.
21. Velicogna I., Sutterley T.C., van den Broeke M.R., Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 2014, 119, pp. 8130–8137.