

УДК 631.474

ТРЕНД ОБЩЕЙ ОБВОДНЕННОСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ, ВЫЯВЛЕННЫЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ GRACE

© 2016 г. **И. Ю. Савин^{1,2}, М. Л. Марков³,
С. В. Овечкин¹, В. А. Исаев¹**

¹*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017,
Россия, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
e-mail: savigory@gmail.com*

²*МГУ им. М.В. Ломоносова,
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12*

³*Государственный гидрологический институт,
199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23*

На основе информации, полученной со спутниковой системы GRACE, проведен анализ динамичности общей обводненности территории за период с 2003–2012 гг. Сравнивались спутниковые данные с информацией о динамике уровня грунтовых вод по отдельным скважинам. Для контроля и сравнения использовано 12 скважин, равномерно распределенных по региону исследований (Центральный Федеральный и Северо-Кавказский Федеральный округа России). Для территории европейской части России выявлена хорошая ковариация между спутниковыми данными и глубиной грунтовых вод. Геоинформационный анализ тренда общей обводненности, полученного по спутниковым данным, показал, что он является положительным на северо-западе территории исследований и отрицательным на юге и юго-востоке. Обнаруживается периодичность в многолетних изменениях общей обводненности на всей территории исследований. Величина периода изменяется от 3 до 8–9 лет. Более длинные периоды наблюдаются в центре и на северо-западе европейской части России, а менее длинные – на севере и юго-востоке. Полученные данные свидетельствуют о том, что при сохранении выявленной периодичности, минимум обводненности на востоке Северного Кавказа, в Вологодской, Ярославской, Московской и Костромской областях будет достигнут в 2016 гг., в центральной части региона исследований и Краснодарском крае в 2018–2019 гг., в Кировской области и Пермском крае в 2016–2017 гг. Полученные данные могут быть использованы при долгосрочном прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур, проведении почвенно-картографических работ, а также закладке новых плодовых насаждений.

Ключевые слова: грунтовые воды, обводненность территории, GRACE, мониторинг, периодичность.

DOI: 10.19047/0136-1694-2016-82-27-41

ВВЕДЕНИЕ

Проблема избыточного увлажнения почв ряда регионов России обострилась в последней четверти XX в. К настоящему времени более 26 млн га почв России переувлажнены (Научные основы..., 2013; Разумов и др., 2014), в том числе и наиболее плодородные из них – черноземные. Формирование переувлажненных почв резко нарушает сложившиеся ландшафтно-геохимические связи, приводит к деградации почв (заболачиванию, засолению, осолонцеванию, слитизации) и трансформации почвенного покрова (Овечкин, Исаев, 1989, Хитров, Назаренко, 2012). Избыточное увлажнение почвы припятствует своевременной ее обработки, ведет к потерям урожая и необходимости общей коррекции агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур.

Повышенное увлажнение почв является результатом интегрального воздействия антропогенного и природного факторов. Природный фактор связан в основном с увеличением атмосферных осадков, а также с региональными особенностями рельефа, литологии почвогрунтов, которые влияют на глубину залегания грунтовых вод и развитость верховодки.

В целом ряде работ (Антипов-Каратаев и др., 1960; Глобальные изменения..., 2009; Зайдельман и др., 2012; Овечкин, Исаев, 1985; Хитров, Назаренко, 2012) периодическое дополнительное почвенно-грунтовое увлажнение рассматривается как фактор эволюции почвенного покрова. Отмечается периодичность в динамике атмосферных осадков и уровня грунтовых вод (Роде, 2009; Шнитников, 1969), в частности на территории черноземной России, где наблюдения были наиболее системными и продолжительными. Указывая на периодичность изменений количества осадков и уровня грунтовых вод в центральных черноземных областях, многие авторы обращают внимание на увеличение средней годовой суммы атмосферных осадков на 150 мм и повышение средне-многолетних среднегодовых температур воздуха на 1.8°C, главным образом, в холодное время года (Базыкина, Бойко, 2008; Червердин, 2013). В работе Савина (1993) продемонстрировано влияние периодичности динамики общей обводненности территории Центрального Черноземья на динамичность почвенного покрова.

Однако детальный анализ динамики увлажнения почв обширных территорий (как европейская часть России) был не возможен в связи с редкими точечными наблюдениями. В последнее время появилась возможность использовать для этих целей данные спутниковых измерений. В настоящей работе представлены результаты анализа географии и динамичности общей обводненности европейской части России на основе спутниковых данных GRACE.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований выступает европейская часть России, которая характеризуется широким спектром природных условий и обводненности территории, а также большой территориальной разнонаправленностью ее изменений.

В качестве основного информационного источника использовали результаты измерений, полученные со спутниковой системы GRACE. Совместная миссия НАСА и Германского космического агентства GRACE была начата в марте 2002 г. В это время на орбиту было выведено два спутника с аналогичными характеристиками, которые синхронно двигаются на высоте 450–500 км по близкой к полярной орбите на расстоянии около 250 км друг от друга (Tapley et al., 2004). Комбинация установленных на спутниках микроволновых инструментов, высокоточных акселерометров и системы глобального позиционирования (GPS) позволяет ежемесячно измерять величину гравитационного поля Земли с пространственным разрешением около 100 км. Эти данные широко используются для повышения точности измерения географических координат на местности, что и является основным назначением этого спутникового тандема.

В качестве побочного продукта выступает возможность анализа динамики всех процессов на земной поверхности и под ней, которые изменяют гравитационное поле Земли. Большая часть этих процессов связана с динамичностью водных масс (Wahr et al., 1998; Tapley et al., 2004; Swenson, Wahr, 2005; Landerer, Swenson, 2011). Данные подобного типа непригодны для локального анализа изменения массы влаги, а также для определения абсолютных величин массы; они позволяют оценивать лишь ее динамичность на больших территориях. Необходимо учитывать, что получаемая информация характеризует динамику влаги на поверхности и во

всей толще земли, включая грунтовые воды. Иными словами, на динамичность спутниковых данных может оказывать влияние как глубина грунтовых вод, так и наличие воды на поверхности Земли в озерах и реках, масса выпадающих осадков, масса аккумулярованного на поверхности снега и льда, а также содержание влаги в почвах. Все это в контексте настоящей работы мы называем общей обводненностью территории (**ООТ**).

Для анализа использовали ежемесячные данные GRACE с пространственным разрешением 100 км за период с 2003 по 2012 гг.

На первом этапе провели анализ наличия тренда в анализируемых временных сериях каждой точки пространственных данных. Для оценки статистической значимости тренда использовали параметрический тест (Bryhn, Dimberg, 2011):

$$t = ((r^2 (n - 2)/(1 - r^2))^{0.5},$$

основанный на распределении Стьюдента (t) со степенью свободы $n - 2$, где n – количество месяцев временной серии, а r – коэффициент корреляции между временной серией и линейно возрастающей функцией времени. Величина t (по таблице распределения Стьюдента) индицирует вероятность, что нулевая гипотеза (наличие тренда) принимается или отвергается.

После этого провели анализ выраженности периодичности во всех временных рядах спутниковых данных. Данный анализ проводили на основе визуального определения временных рядов, что было связано с недостаточностью информации для статистического анализа периодичности.

Для проведения статистического анализа использовали пакет Statistica 6.0.

Результаты статистического анализа импортировали в ГИС PLWIS v.3.3, после чего в ГИС проводили их интерполяцию на территорию исследований с помощью метода скользящего среднего.

Кроме того, проводили сравнение спутниковых данных об ООТ с данными динамики уровня грунтовых вод по отдельным скважинам. Для контроля и сравнения использовали 12 скважин, равномерно распределенных по региону исследований (Центральный Федеральный и Северо-Кавказский Федеральный округа) (рис. 1).

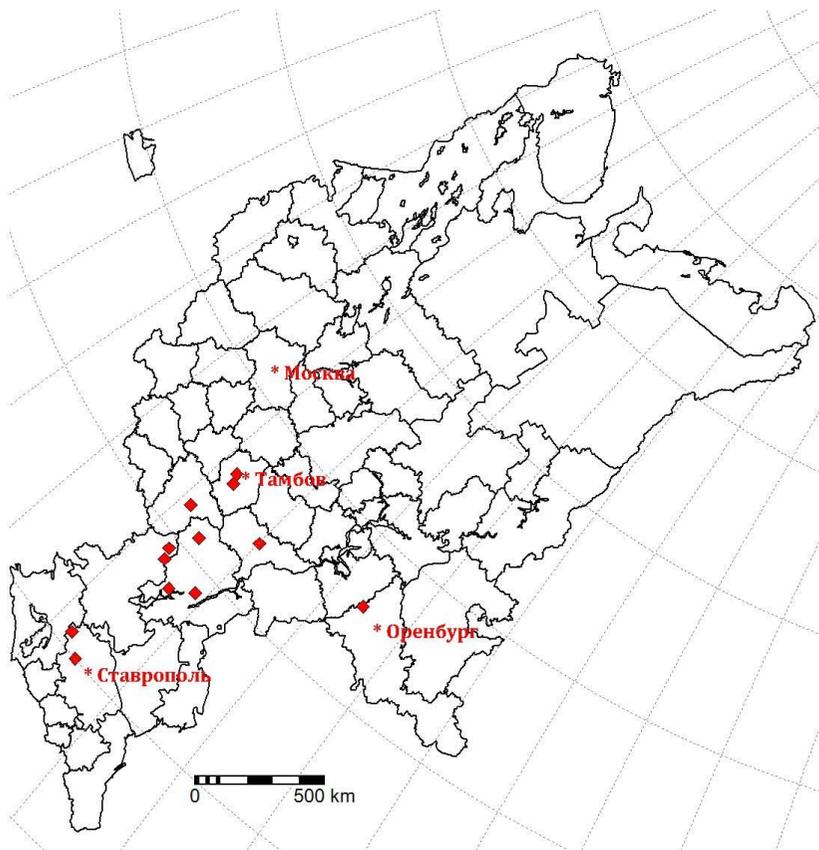


Рис. 1. Место расположения скважин с измерениями уровня грунтовых вод (значки).

Измерения уровня грунтовых вод проводили в конкретные дни с неравномерным временным шагом, поэтому их предварительно трансформировали в ежемесячные данные. Для этого каждому месяцу приписывали минимальное (как наиболее значимое для ландшафта) значение уровня грунтовых вод из всех измерений конкретного месяца. В качестве меры сходства спутниковых данных и информации об уровне грунтовых вод использовали коэффициент корреляции величин годового минимума обоих показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компоненты общей обводненности территории взаимосвязаны друг с другом. Так, общеизвестна связь количества атмосферных осадков с влажностью воздуха и почв, с уровнем грунтовых вод и уровнем воды в водоемах. Во многих случаях влажность почв и уровень воды в водоемах взаимосвязаны с глубиной залегания грунтовых вод. Конечно, данные взаимосвязи не прямолинейны и достаточно сложны. Отсутствие надежных глобальных моделей водного баланса, а также необходимых данных не позволяет на данном этапе вычленить роль каждого из них в изменении спутниковых данных общей обводненности. Поэтому для сопоставления со спутниковыми данными был выбран наиболее консервативный из всех вышеназванных показателей – уровень грунтовых вод (**УГВ**).

Визуальный анализ ковариации спутниковых данных и УГВ по отдельным скважинам показал их хорошую сходимость (рис. 2). Сезонность изменения УГВ и спутниковых данных совпадает очень хорошо и практически без временного лага, что, по-видимому, свидетельствует о высоком влиянии как на спутниковые данные, так и на УГВ выпадающих атмосферных осадков.

Для исключения влияния сезонности проведено сравнение годовых минимумов величин УГВ и спутниковых данных. Оказалось, что временной ход графиков этих параметров очень близок друг другу (рис. 3). При этом статистически значимый коэффициент корреляции для разных скважин составляет 0.46–0.83. Разброс коэффициента корреляции связан, по-видимому, с разной силой влияния местных условий на компоненты общей обводненности территории.

Но в любом случае, взаимосвязь между спутниковыми данными и УГВ прослеживается для всех проанализированных точек с данными об УГВ достаточно хорошо, что позволяет использовать спутниковые данные в качестве индикатора общей обводненности территории.

Всего для территории исследований проанализировано более 6 тыс. точек (пикселей) спутниковых данных. Статистически значимый тренд показателя ООТ за период с 2003 по 2012 гг. был выявлен для 72% всех проанализированных точек. Отрицательный

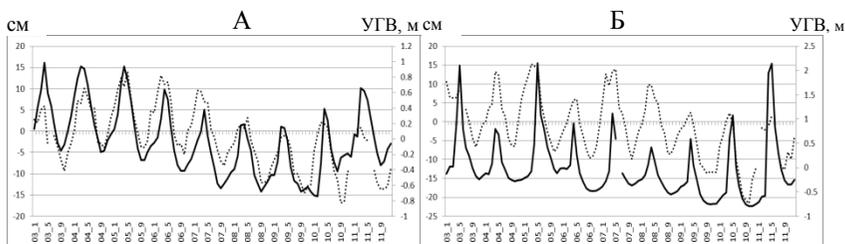


Рис. 2. Примеры сопоставления спутниковых данных и колебаний уровня грунтовых вод (А – скважина в Волгоградской области, Б – в Оренбургской). Спутниковые данные показаны точечной линией, уровень грунтовых вод – сплошной. По шкале абсцисс первые две цифры – год (03 – обозначает 2003 г. и т.п.), последняя – месяц года.

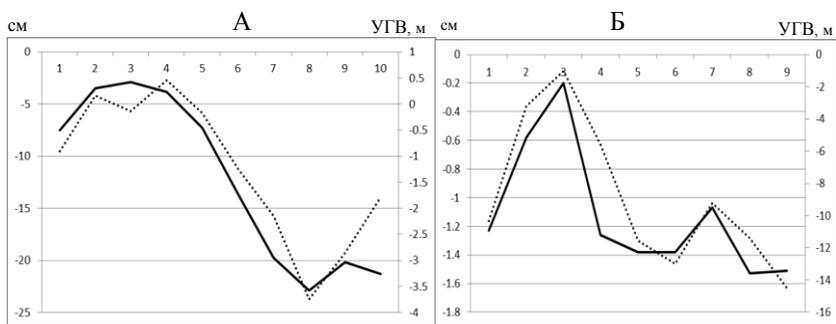


Рис. 3. Примеры сопоставления динамики годового минимума спутниковых данных и колебаний уровня грунтовых вод (А – скважина в Воронежской области, Б – в Ставрополье). Спутниковые данные показаны точечной линией, уровень грунтовых вод – сплошной. Шкала абсцисс – месяц года.

тренд выявлен для 60% всех проанализированных точек. Географически точки с положительным трендом приурочены к северо-западной и северной частям европейской части России, а с отрицательным трендом – к южной и юго-восточной (рис. 4).

Необходимо отметить, что территории с наблюдаемым в последние годы подъемом уровня грунтовых вод расположены в зоне с отрицательным трендом. Согласно этим данным, в ближайшие годы можно ожидать снижения уровня грунтовых вод в этих регионах. Этот вывод полностью согласуется с прогнозными оценками, приведенными в Оценочном докладе Росгидромета (Оценочный доклад..., 2008).

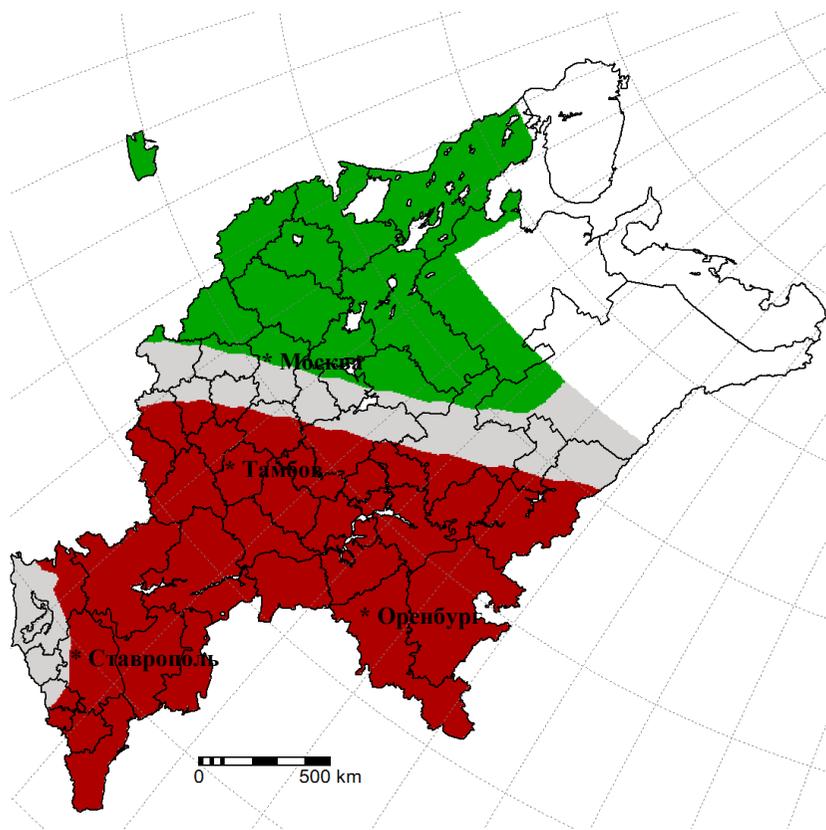


Рис. 4. Тренд изменения общей обводненности территории по спутниковым данным (зеленый – положительный, красный – отрицательный).

Но общая тенденция осложняется наблюдаемой многолетней периодичностью в ООТ (Шнитников, 1969). Эта периодичность проявляется в различной степени и имеет разный период. Примеры периодичности для отдельных точек спутниковые данные приведены на рис. 5. Для каждой точки был определен период динамики ООТ, а также год последнего наблюдаемого минимума. Интерполяция результатов анализа периодичности позволила оценить ее пространственное варьирование на территории исследований (рис. 6). Оказалось, что в центральной части европейской части России общая обводненность (на фоне тренда) изменяется с периодом в 7–8 лет. На северо-западе региона периодичность еще

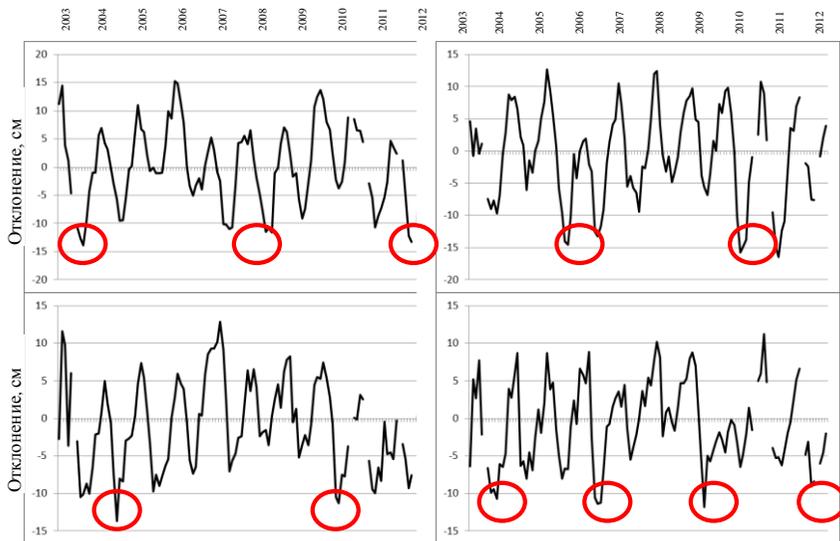


Рис. 5. Примеры периодичности в спутниковых временных рядах (овалом отмечены локальные минимумы, образующие периодичность). Приведены ежемесячные данные. Каждый локальный минимум и максимум соответствуют календарному году (первый максимум – 2003 г.).

на 1–2 года длиннее. На Северном Кавказе периодичность составляет около 4–5 лет, а на юго-востоке территории (Оренбургская область и Башкортостан) выявляется периодичность в 3–4 года. Необходимо отметить, что периодичность по отдельным точкам выделяется не всегда четко, но результаты, представленные в виде карты, четко демонстрируют вышеназванные закономерности. Выявленные закономерности уменьшения продолжительности периодов многолетних колебаний водных ресурсов с севера на юг европейской территории России согласуются с результатами исследований, приведенными в публикациях Росгидромета (Пространственно-временные..., 1988; Водные ресурсы..., 2008).

Данные о периодичности вместе с данными о последнем минимуме ООТ позволяют построить прогнозную карту года наступления следующего минимума (рис. 7). Полученная информация свидетельствует о том, что минимум обводненности будет достигнут в 2016 гг. на востоке Северного Кавказа, в Вологодской, Ярославской, Московской и Костромской областях, в 2018–2019 гг. –

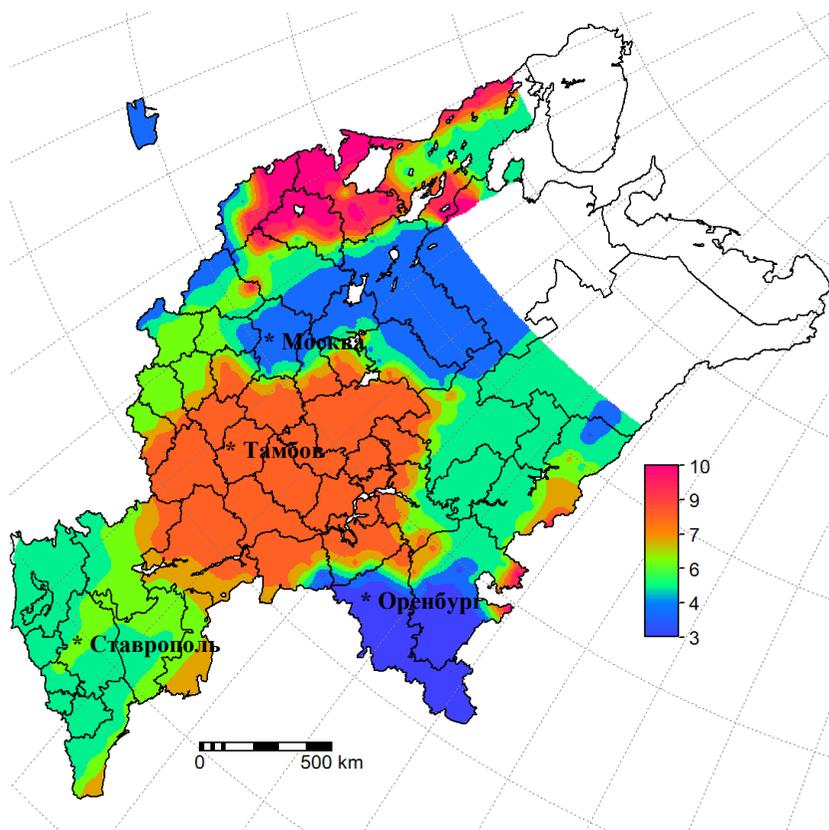


Рис. 6. Периодичность общей обводненности территории, выявленная на основе анализа спутниковых данных GRACE (цветом показана длина периода в годах).

в центральной части региона исследований и в Краснодарском крае, в 2016–2017 гг. – в Кировской области и Пермском крае. В эти годы на указанных территориях общая обводненность должна достигнуть локального минимума, и затем должен начаться подъем.

Полученные данные дают лишь общее представление о динамичности ООТ. Но даже с учетом их схематичности могут быть полезными при долгосрочном прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур, при проведении почвенно-картографических работ, а также при закладке новых плодовых насаждений.

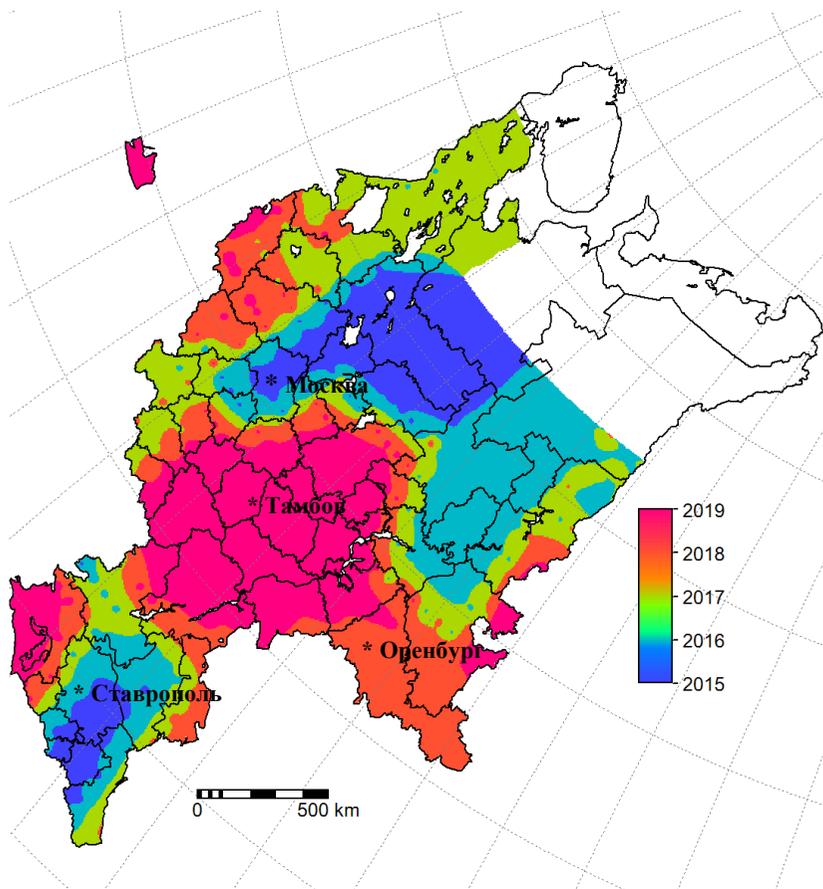


Рис. 7. Карта-прогноз года следующего минимума общей обводненности территории (цветом показаны годы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что спутниковые данные GRACE об общей обводненности территории хорошо коррелируют с уровнем грунтовых вод.

Геоинформационный анализ тренда общей обводненности, полученного по спутниковым данным, показал, что он является положительным на северо-западе территории исследований и отрицательным на юге и юго-востоке.

Обнаруживается периодичность в многолетних изменениях общей обводненности. Величина периода изменяется от 3 до 8–9 лет. Более длинные периоды наблюдаются в центре и на северо-западе европейской части России, а менее длинные – на севере и юго-востоке.

При сохранении выявленной периодичности наступление ее очередного локального минимума в центре европейской части России и Краснодарском крае можно ожидать в 2018–2019 гг., а на севере европейской части России и Ставрополье – в 2015–2016 гг.

Дальнейшее накопление спутниковых данных GRACE даст возможность сделать прогнозы и оценки более точными.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 14-38-00023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов-Каратаев И.Е., Юрин И.А., Кадер Г.М., Фролкина Л.А. Сравнительные испытания новых комплексных агролесомелиоративных и агротехнических методов освоения содово-сульфатных солонцов Центрально-Черноземной полосы // Мелиорация солонцов в Черноземной зоне европейской части СССР. М., 1960. С. 5–219.
2. Базыкина Г.С., Бойко О.С. [Влияние аномальных погодных условий последних десятилетий на водный режим типичных черноземов заповедной степи \(Курская область\)](#) // Почвоведение. 2008. № 7. С. 833–844.
3. Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России. М., 2009. 517 с.
4. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: Изд-во ГГИ, 2008. 598 с.
5. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н. Деградационные изменения богарных черноземов лесостепной и степной зоне европейской России в результате переувлажнения и мелиоративные мероприятия по восстановлению их плодородия // [Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация](#). М., 2012. С. 11.
6. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирование систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2013. 900 с.
7. Овечкин С.В., Исаев В.А. Периодическое дополнительное почвенно-грунтовое увлажнение как фактор эволюции почвенного покрова. Вопросы гидрологии в плодородии почв. Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1985. С. 56–65.

8. *Овечкин С.В., Исаев В.А.* Периодически переувлажненные почвы ЦЧР // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1989. С. 18–25.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008 230 с.
10. Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред. Рождественского А.В. М.: Гидрометеиздат, 1988. 276 с.
11. *Разумов В.В., Молчанов Э.Н., Глушко А.Я., Разумова Н.В.* [К проблеме подтопления земель на юге европейской части России](#) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. № 73. С. 3–28.
12. *Роде А.А.* Многолетняя изменчивость атмосферных осадков и элементов водного баланса почв. Избр. тр. 2009. Т. IV. С. 479–578.
13. *Савин И.Ю.* Реакция почвенного покрова на гелио-геофизически обусловленные колебания климата // География и природные ресурсы. 1993. № 3. С. 11–16.
14. *Хитров Н.Б., Назаренко О.Г.* Распространение переувлажненных почв в исходно автоморфных агроландшафтов Ростовской области при ведении “сухого” земледелия // Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. М., 2012. С. 125–166.
15. *Шнитников А.В.* Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Изд-во АН СССР, 1969.
16. *Чеведрин Ю.И.* Изменение свойств почв юго-востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия. Воронеж: Истоки, 2013. 334 с.
17. *Bryhn A.C., Dimberg P.H.* [An operational definition of a statistically meaningful trend](#) // PLoS One. 2011. Vol. 6(4). P. e19241. doi: 10.1371/journal.pone.0019241.
18. *Landerer F.W., Swenson S.C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Res. Res. 2012. Vol. 48. P. W04531. doi: 10.1029/2011WR011453.
19. *Swenson S.C., Wahr J.* [Post-processing removal of correlated errors in GRACE data](#) // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. P. L08402. doi: 10.1029/2005GL025285.
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. P. L09607. doi:10.1029/2004GL019920.
21. *Wahr J., Molenaar M., Bryan F.* [Time-variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE](#) // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103(30). P. 205–230.

TREND IN TOTAL CONTENT OF SOIL WATER AT THE TERRITORY OF EUROPEAN RUSSIA IDENTIFIED

**I. Yu. Savin^{1,2}, M. L. Markov³,
S. V. Ovechkin¹, V. A. Isaev¹**

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 119017 Moscow, Puzhevskii 7, bld. 2
e-mail: savigory@gmail.com*

²*Lomonosov Moscow State University Faculty of Geography, Russia, 119991,
Moscow, 1 Leninskiye Gory*

³*State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, 2nd Line VO, 23*

The data obtained by GRACE satellite allowed comprehensively analyzing the dynamics of total water content in soils within the period from 2003 to 2012 at the territory of European Russia. Having compared the satellite data and the information on the dynamics of the groundwater level obtained in the course of field survey by using 12 evenly distributed bore holes at the studied territory (Central Federal and North-Caucasian Federal regions), it is worth emphasizing that there is a clearly expressed co-variation between the satellite images and the groundwater depth. The GIS-analysis of trend in total water content identified by satellite data showed that it is positive towards the north-western and negative in the south and south-eastern part of European Russia. The total content of soil water reveals periodical changes in the range from 3 to 8–9 years. The prolonged periods are observed in central and north-western parts, being shortened towards the north and south-east of the studied territory. The obtained data serve as evidence of periodically changing the total water content in soils but its minimum will be observed in the east of Northern Caucasus, in Vologda, Yaroslavl, Moscow and Kostroma regions in 2016, in central part and Krasnodar region in 2018–2019 and in Kirov and Perm' regions in 2016–2017. The results of the given studies can find a use in long-term forecasting of crop yields, in soil mapping and cultivation of new fruit plantations.

Keywords: ground water, total content of soil water, GRACE, monitoring, periodicity.