



Почвоведение и агрохимия Soil science and agrochemistry

DOI 10.22363/2312-797X-2020-15-4-363-374
УДК 556: 551.582.3

Научная статья / Research article

Особенности многолетней динамики общей обводненности территории Белгородской области, выявляемые по спутниковым данным GRACE

И.Ю. Савин^{1, 2*}, Б.С. Габдуллин³

¹ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

*savin_iyu@esoil.ru

Аннотация. Анализ многолетней динамичности общей обводненности территории Белгородской области проведен с использованием ежемесячных спутниковых данных GRACE за период с 2002 по 2016 гг. Выявлена корреляция спутниковых данных с климатическим водным балансом с лагом, варьирующим на территории области от 2 до 4 месяцев. Установлено, что начиная с 2008 г. на территории Белгородской области отмечается устойчивая тенденция к уменьшению общей обводненности, преобладание отрицательных значений. Минимум достигает наименьших значений по сравнению со всем изучаемым периодом. При этом сезонность изменения значений сохраняется в течение всего временного ряда. Периодичность изменения общей обводненности на всей территории исследований выражена не очень четко: хорошо выражен лишь многолетний максимум общей обводненности территории в 2006 г. Еще один — менее выраженный локальный максимум — наблюдался в 2013 г. Локальные многолетние минимумы общей обводненности территории приурочены к 2002, 2009 и 2015 гг. Отмечается положительный тренд амплитуды сезонных колебаний общей обводненности территории: в последние годы амплитуда постоянно нарастает. На всей территории Белгородской области наблюдается отрицательный многолетний тренд значений общей обводненности территории с их достаточно большим пространственным варьированием. С северо-запада на юго-восток области происходит понижение угла наклона тренда. Спутниковые данные GRACE могут служить достаточно надежным индикатором выявления тренда общей обводненности больших территорий.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, обводненность территории, GRACE, Белгородская область

© Савин И.Ю., Габдуллин Б.С., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

Заявление о конфликте интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ (№ 19-05-50063).

История статьи:

Поступила в редакцию: 2 июня 2020 г. Принята к публикации: 17 июня 2020 г.

Для цитирования:

Савин И.Ю., Габдуллин Б.С. Особенности многолетней динамики общей обводненности территории Белгородской области, выявляемые по спутниковым данным GRACE // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2020. Т. 15. № 4. С. 363–374. doi: 10.22363/2312-797X-2020-15-4-363-374

Specifics of long-term dynamics of terrestrial water storage detected using GRACE satellite in Belgorod region

Igor Yu. Savin^{1,2*}, Bakhytnur S. Gabdullin³

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

²Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: savin_iyu@esoil.ru

Abstract. GRACE monthly satellite data for the period from 2002 to 2016 were used to analyze the long-term dynamics of the terrestrial water storage in the Belgorod region of Russia. The correlation of satellite data with climatic water balance with a lag varying on the territory from 2 to 4 months was revealed. There was found a stable tendency to decrease in terrestrial water storage, and predominance of negative values on the territory of the Belgorod region since 2008. The minimum attains the lowest values in comparison with the whole studied period. However, seasonality of the changes is maintained throughout the entire analyzed time series. The frequency of changes in the terrestrial water storage throughout the entire area is not very clear: only the long-term maximum of the terrestrial water storage of the territory in 2006 is well expressed. Another, less pronounced local maximum was observed in 2013. Local long-term minima of the terrestrial water storage of the territory were in 2002, 2009 and 2015. There is a positive trend in the amplitude of seasonal fluctuations in the terrestrial water storage of the territory: the amplitude has been constantly increasing in recent years. The territory of the Belgorod region has negative long-term trend of terrestrial water storage with their rather large spatial variation. The angle of inclination of the trend decreases from north-west to south-east in the region. GRACE satellite data can serve as a fairly reliable detection indicator of the trend of terrestrial water storage in large areas.

Keywords: satellite monitoring, terrestrial water storage of the territory, GRACE, Belgorod region

Conflicts of interest

The authors declared no conflicts of interest.

Financing. Acknowledgments

The research was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (No. 19-05-50063).

Article history:

Received: 2 June 2020. Accepted: 17 June 2020

For citation:

Savin IY, Gabdullin BS. Specifics of long-term dynamics of terrestrial water storage detected using GRACE satellite in Belgorod region. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2020; 15(4):363–374. (In Russ). doi: 10.22363/2312-797X-2020-15-4-363-374

Введение

Увлажнение почв основной земледельческой зоны России является одним из факторов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур. Во многих научных публикациях указывается на то, что оно не является постоянным, а изменяется. Причем периодичность изменений на данной территории подвержена цикличности, что приводит к чередованию лет с повышенным и пониженным увлажнением. Наиболее четко выражены циклы, сопоставимые с циклами солнечной активности (11 лет и 22 года), циклами Брикнера (около 40 лет) и с вековыми циклами (80—90 лет) [1—4]. В России повышенной увлажненностью характеризуется 26,2 млн га почв [5, 6]. Особое беспокойство вызывает переувлажнение черноземов, являющихся основной житницей на которых производится основная часть хлебных зерновых культур в стране. Переувлажнение почв в большинстве случаев возникает из-за изменений климата, воздействие которых может усугубляться спецификой землепользования. Увеличение или уменьшение количества атмосферных осадков приводит к изменению глубины залегания грунтовых вод и присутствию в почвах верховодки. Эти процессы приобретают региональную специфику из-за разницы в рельефе, геологическом строении территории, использовании земель в сельском и лесном хозяйстве и водопотреблении населенных пунктов и промышленных предприятий.

Согласно данным [7, 8] на территории центральных черноземных областей России в последние годы сумма среднегодовых осадков увеличилась в среднем на 150 мм, а температура воздуха возросла в среднем на 1,8 °С.

Изучение многолетней динамики увлажнения любой территории обычно сильно ограничивается недостатком или полным отсутствием данных реальных полевых наблюдений. Спутниковые данные и цифровые технологии мониторинга влажности почв на основе данных микроволновой съемки используются достаточно давно (к примеру, данные со спутников SMOS, CMIS (NOAA), AQUA (AMSR), SMAP (NASA) и т.п.). Но эти данные отражают влажность лишь поверхностного слоя почв. Для их пересчета на корнеобитаемую толщу требуется большое количество дополнительных данных о почвах региона исследований, которые часто недоступны. Кроме того, на содержание и качество подобных изображений оказывают влияние дополнительные факторы, предопределяющие особенности процесса взаимодействия СВЧ сигнала с земной поверхностью (рельеф и шероховатость поверхности, свойства почв, растительность).

В последнее время появилась возможность использования для анализа динамики увлажненности территории данных спутниковых измерений GRACE¹. С момента начала миссии уже опубликовано достаточно научных работ как за рубежом [9—11], так и в России [12—15], в которых на разных уровнях обобщения показана эффективность использования таких данных для анализа динамики уровня грунтовых вод, уровня воды в озерах и обводненности рек, содержания влаги в водосборах рек и в снежном покрове. Но, как и для других подобных

¹ Grace Mission // NASA. Режим доступа: https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/index.html Дата обращения: 16 февраля 2020 г.

по уровню генерализации данных, основная проблема заключается в том, что для поиска их связей с параметрами обводненности нужно большое количество фактических данных об обводненности, которые во многих случаях отсутствуют или имеются в ограниченном количестве. Поэтому любое дополнительное исследование в области исследования возможностей использования данных GRACE представляется ценным.

Цель исследования — оценить возможности использования данных GRACE для анализа динамичности обводненности территории Белгородской области, где влага в основном содержится в почвах и грунтах.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выбрана территория Белгородской области, которая располагается на Европейской части России (рис. 1).

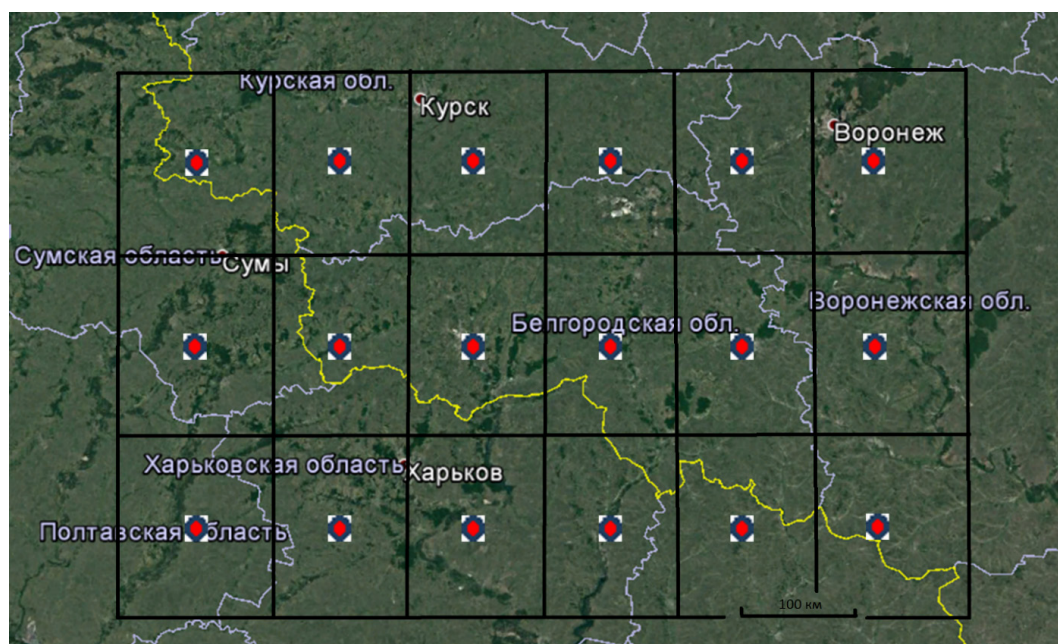


Рис. 1. Пространственные ячейки с измерениями GRACE на территории исследований: центры ячеек показаны красным цветом, границы — черным

Fig. 1. Spatial cells with GRACE measurements in the area studied: cell centers — red; borders — black

Для исследований выбрана именно территория области, а не водосборных бассейнов или почвенных районов, так как все практические управленческие решения принимаются в большинстве своем именно на областном уровне, а не на уровне каких-либо физико-географических выделов.

Основной источник данных — измерения, полученные с помощью спутниковой системы GRACE за период с 2003 по 2016 гг. Система представлена двумя спутниками, запущенными 17 марта 2002 г. и двигающимися на высоте

450...500 км. Спутники были созданы и выведены на орбиту для повышения точности измерения географических координат. Но спутники позволяют также осуществлять мониторинг процессов, которые изменяют гравитационное поле Земли. Одним из основных подобных процессов является содержание воды на земной поверхности, в почвах и недрах [16—19], т.е. данные можно использовать в качестве некоего интегрального индикатора содержания воды в недрах земель, озерах и реках, выпадающих осадках, в аккумулятивном на поверхности снеге и льде и содержания влаги в почвах и растительности. Это суммарное содержание воды мы называем общей обводненностью территории (ООТ). Ежемесячные спутниковые данные представлены значениями изменений параметра «толщина эквивалентного слоя воды» (ТЭСВ) в сантиметрах относительно среднего значения за период 01.2004—12.2009 гг., который и рассматривается нами как показатель общей обводненностью территории.

Использовались ежемесячные измерения в течение 13 лет, указанных выше. Необходимо отметить, что для некоторых лет существуют пропуски в данных по нескольким месяцам.

Кроме того, проводилось цифровое сравнение спутниковых данных о ТЭСВ с данными динамики потенциального климатического водного баланса (КВБ), который представляет собой разницу между количеством выпавших осадков и потенциальной испаряемостью с поверхности стандартного растительного покрова. Информация о КВБ была получена из архива климатического реанализа ERA-INTERIM Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды в Рединге (Великобритания)². Исходные данные представлены в архиве в виде равномерной пространственной сетки с пространственным шагом 0,25 градуса. На первом этапе анализа декадные данные архива были агрегированы в ежемесячные, а затем усреднены для каждой пространственной ячейки данных GRACE.

Анализ ежемесячных данных о ТЭСВ проводился в программах MSExcel и Statistica 6.0. Вначале определялся угол наклона многолетнего тренда отдельно для каждой ячейки пространственных данных (см. рис. 1). Для этого строились графики распределения значений ТЭСВ и определялась линия многолетнего тренда. Затем полученные данные импортировались в ГИС ILWIS3.31 и на их основе составлялись карты вариации угла наклона тренда в пространстве с помощью интерполяции данных методом скользящего среднего (Moving Average Linear Decrease; Weight exponent = 1; Limiting Distance = 1).

На следующем этапе выявляли периодичность и определяли характер распределения ежемесячных данных на основе визуального анализа гистограмм. Также анализировали сезонность вариации данных и амплитуду значений в течение года.

Кроме того, проводилось сопоставление ежемесячных измерений ТЭСВ и климатических данных за период 2003—2011 гг. с помощью анализа распределенных лагов (Distributed Lags Analysis). Охват неполного временного отрезка связан с тем, что отсутствуют исходные данные по 6 месяцам в 2002 и 2016 гг., по 3 и более месяцам в 2012—2015 гг.

² ERA-Interim // ECMWF. Режим доступа: <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim> Дата обращения: 10 февраля 2020 г.

Результаты исследований и обсуждение

Проведенный анализ показал, что в изучаемом временном ряду (2003—2016 гг.) наблюдается сезонность вариации значений ТЭСВ. До 2008 г. преобладают положительные значения ТЭСВ. Максимальные значения достигаются в весенние месяцы, минимальные отрицательные значения отмечаются в осенние месяцы (сентябрь, октябрь, ноябрь), в отдельные годы — в декабре месяце.

До 2006 г. заметен нарастающий тренд значений ТЭСВ, причем это характерно почти для всех месяцев в году. Даже минимум значений в году значительно увеличивается, особенно в период 2003—2004 гг. Затем с 2006 по 2008 гг. наблюдается обратная картина: значения ТЭСВ резкими темпами уменьшаются и минимум достигает тех же значений, что и в 2002 г.

Однако в период 2008—2016 гг. ранее наблюдаемые колебания не отмечаются. Начиная с 2008 г. наблюдается устойчивый тренд понижения значений общей обводненности территории, все значения большей частью становятся отрицательными. В период 2008—2013 гг. значения минимума сохраняются примерно в одних пределах значений. Затем в 2014—2015 гг. происходит резкое увеличение минимума. В связи с недостатком статистических данных нельзя сказать, является это периодичностью или нет. При всем этом сохраняется сезонность вариации значений в течение года. В 2014—2015 гг. значения ТЭСВ достигают наименьшего значения по сравнению со всем изучаемым периодом. После 2014 г. положительные значения величин ТЭСВ отсутствуют (рис. 2).

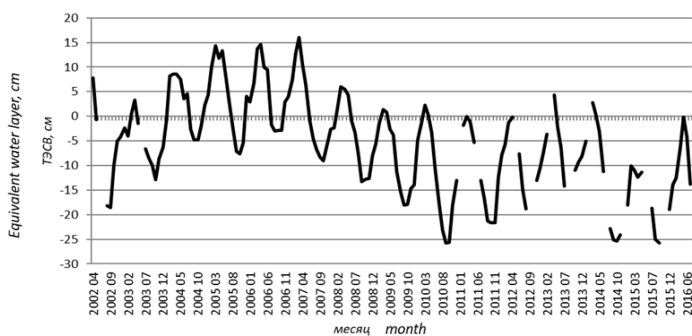


Рис. 2. Пример вариации значений ТЭСВ за период 2002–2016 гг.

Fig. 2. Variation of terrestrial water storage in 2002–2016

Сезонность вариации значений выражается в следующем: значения временного ряда в течение года имеют форму, близкую к синусоиде. Сначала идет подъем к весенним месяцам, затем подъем сменяется спадом в осенних месяцах. Самые высокие значения за год отмечаются в марте, апреле, мае, июне, самые низкие значения — в сентябре, октябре и ноябре. Анализ полученных данных показал, что сезонность связана с ежемесячным изменением климатических условий (рис. 3).

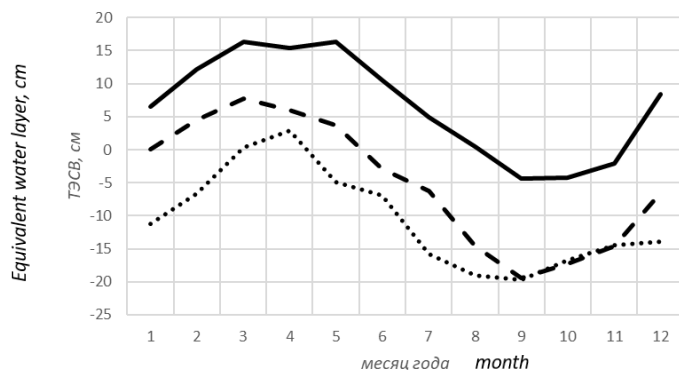


Рис. 3. Примеры вариации значений ТЭСВ в течение года: сплошная линия – в 2005 г.; пунктирная – в 2010 г.; точечная – в 2013 г.

Fig. 3. Variations of terrestrial water storage during the year: solid line – in 2005; dash line – in 2010; dotted line – in 2013

Представленные примеры отражают общую закономерность практически для всех проанализированных пространственных ячеек с данными по ТЭСВ.

В 2005 г. преобладают положительные значения ТЭСВ в течение почти всего года. В весенние месяцы величина этого параметра достигает максимума (> 15 см). Отрицательные значения отмечаются лишь в осенние месяцы.

В 2010 г. картина значительно меняется: в году начинают преобладать отрицательные значения. ТЭСВ достигает минимума в сентябре. Невысокие положительные значения сохраняются лишь в феврале, марте, апреле, мае.

В 2013 г. положительные значения почти совсем отсутствуют (за исключением апреля).

Все это свидетельствует об отрицательном тренде общей обводненности территории области за анализируемый период.

Отдельно для каждой пространственной ячейки измерений ТЭСВ был проведен расчет ежегодной амплитуды его значений для периода 2002–2015 гг. (рис. 4). В ходе ежегодной динамики внутригодовых измерений общей обводненности можно выделить определенную периодичность.

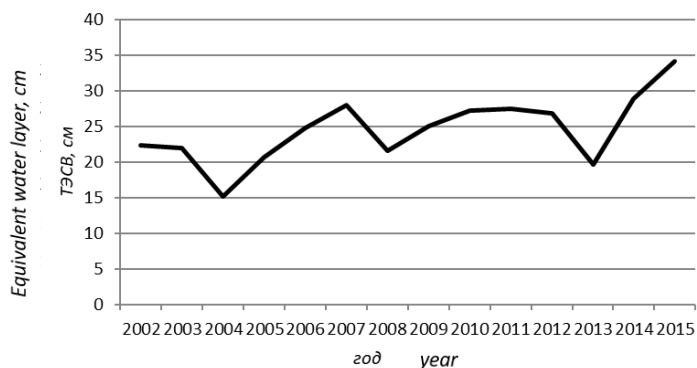


Рис. 4. Изменение годовой амплитуды значений общей обводненности в период 2002–2015 гг.

Fig. 4. Changes in the annual amplitude of terrestrial water storage in 2002–2015

В 2002—2003 гг. наблюдаются близкие значения годовой амплитуды (плато), 2004 г. характеризуется ее резким спадом, с 2005—2007 гг. отмечается рост значений, затем в 2008 г. значение годовой амплитуды приближается к уровню 2005 г. и до 2010 гг. возрастает схожим образом. Характер значений в 2011—2015 гг. близок к периоду 2002—2006 гг. (сначала плато сменяется резким спадом, которое переходит в ступенчатый рост), но с повышением годовой амплитуды на порядок.

Таким образом, годовая амплитуда ТЭСВ на территории исследований возрастает, что является свидетельством возрастания внутригодовой контрастности условий увлажнения и скорее всего связано со спецификой наблюдаемых климатических изменений.

Путем построения графиков и добавления к ним линии тренда изменения данных в программе MS Excel определялся угол наклона тренда ТЭСВ для центра каждой пространственной ячейки в отдельности. На основании полученных данных и их интерполяции в ГИС была построена карта углов наклона линии тренда (рис. 5). Согласно карте изменения углов наклона тренда ТЭСВ было выяснено, что по всей территории наблюдается отрицательный тренд вариации значений. Причем показатель довольно сильно варьирует по области. С северо-запада на юго-восток происходит понижение угла наклона тренда (с $-0,11$ до $-0,14$). Наибольшую площадь занимает значение тренда в пределах $-0,11$ до $-0,12$. Для крайнего запада Белгородской области характерен угол наклона тренда $-0,10$, для крайнего юго-востока — $-0,13$ (рис. 5).

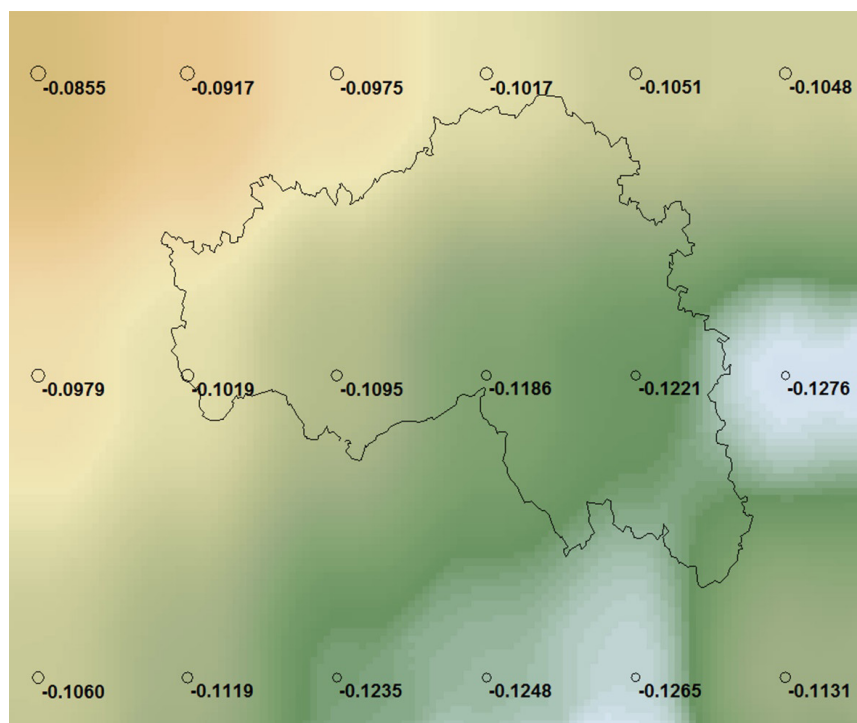


Рис. 5. Карта углов наклона линии тренда ТЭСВ: цветом и числами на карте показаны значения угла наклона линейного тренда; черная линия — граница Белгородской области

Fig. 5. Map of the slope angles of the terrestrial water storage trend line: the values of slope of linear trend are shown on the map with color and numbers; black line — the border of the Belgorod region

Что касается периодичности, то на всей территории очень хорошо выражен многолетний максимум ТЭСВ в 2006 г. Еще один — менее выраженный локальный максимум — наблюдается в 2013 г. Локальные многолетние минимумы ТЭСВ приурочены к 2002, 2009 и 2015 гг. (см. рис. 1).

Был проведен анализ двух временных рядов (ТЭСВ и КВБ) за период 2003—2011 гг. с помощью Distributed Lags Analysis (анализ распределенных лагов). В анализе Distributed Lags Analysis временные ряды сопоставлялись с лагом равным сезонности данных (12 месяцев). В качестве независимого временного ряда был представлен КВБ, зависимого — ТЭСВ.

В результате проведенного анализа была обнаружена связь между временными рядами с лагом, значение которого колеблется в пределах 2...4 месяца (наибольшее t -значение). Это говорит о том, что изменения в климатическом водном балансе сказываются на ООТ с задержкой в 2...4 месяца.

На основании полученных данных анализа с помощью интерполяции данных методом Moving Average были построены карты пространственного варьирования в пределах области размера лага и значений R^2 регрессии между КВБ и ТЭСВ (рис. 6). Согласно рисунку в южной и центральной части территории области распространен лаг в пределах 3...4 месяцев. Лаг, равный 2 месяцам, преобладает на западе, востоке, юго-востоке и севере.

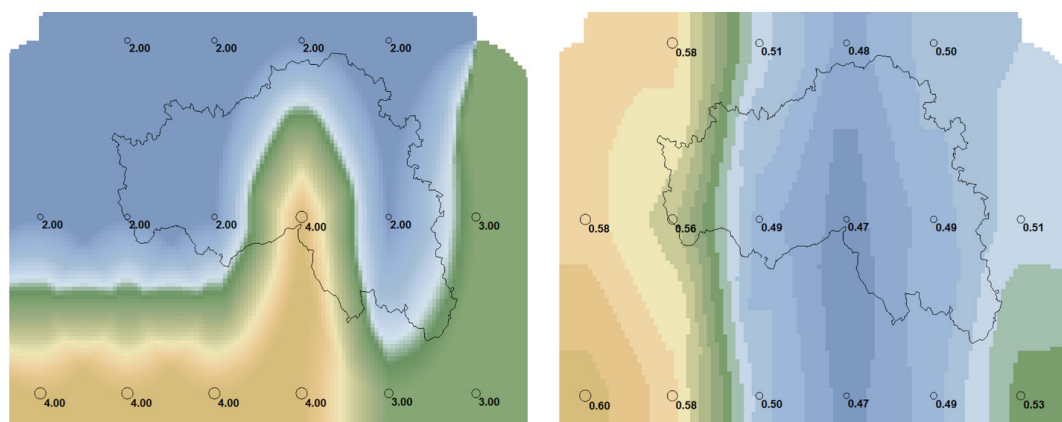


Рис. 6. Результаты анализа распределенных лагов: слева — карта размера лага; справа — карта значений R^2

Fig. 6. Results of the distributed lags analysis: left — a map of lag size; right — a map of R^2 values

Коэффициент детерминации довольно сильно варьирует на территории области. В целом значение коэффициента увеличивается с центральной части к западной, северной и восточной. Преобладает значение R^2 в пределах 0,47...0,50 (p -значения 0,005...0,011). Максимум R^2 достигается на западе области (0,57, p -значение 0,002) (см. рис. 6).

Необходимо отметить, что подобный временной лаг между ТЭСВ и метеоданными уже отмечался исследователями ранее [13]. Но, в отличие от нас, ими была выявлена связь с температурой воздуха на высоте 2 метра, а не с КВБ. Кроме того,

в отдельных частях области лаг составил 3...4 месяца. По-видимому, размер лага зависит от специфики климатических условий и общей обводненности конкретной территории.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что начиная с 2008 г. на территории Белгородской области отмечается устойчивая тенденция понижения общей обводненности, преобладание отрицательных значений. Минимум достигает наименьших значений по сравнению со всем изучаемым периодом. При этом сезонность изменения значений сохраняется в течение всего временного ряда. Периодичность изменения общей обводненности на всей территории исследований выражена не очень четко: хорошо выражен лишь многолетний максимум ТЭСВ в 2006 г. Еще один, менее выраженный локальный максимум наблюдается в 2013 г. Локальные многолетние минимумы ТЭСВ приурочены к 2002, 2009 и 2015 гг.

Отмечается положительный тренд амплитуды сезонных колебаний общей обводненности территории: в последние годы амплитуда постоянно нарастает.

На всей территории Белгородской области наблюдается отрицательный многолетний тренд значений ТЭСВ. Выявлено достаточно большое пространственное варьирование тренда на территории области. С северо-запада на юго-восток происходит понижение угла наклона тренда.

Проведенный анализ сопряженности временных рядов ТЭСВ и климатического водного баланса выявил значимую связь с преобладающим лагом в 2...4 месяца. При этом на юге и в центральной части области лаг составляет 3...4 месяца.

Полученные данные могут быть использованы при принятии упреждающих управленческих решений в области развития растениеводства области. На основе спутниковых данных GRACE существует возможность заблаговременного прогнозирования общей обводненности территории области. Подобная информация является основой для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, а также для планирования сева тех культур, которые могут быть наиболее урожайными с учетом подобных прогнозов в конкретном сезоне вегетации.

Библиографический список

1. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Изд-во АН СССР, 1969. 284 с.
2. Савин И.Ю. Реакция почвенного покрова на гелио-геофизически обусловленные колебания климата // География и природные ресурсы. 1993. № 3. С. 11—18.
3. Роде А.А. Многолетняя изменчивость атмосферных осадков и элементов водного баланса почв. Избранные труды. М.: Наука, 2009. Т. IV. С. 479—578.
4. Чендев Ю.Г., Лебедева М.Г., Матвеев С.М., Петин А.Н., Долгих А.В., Смирнова Л.Г., Соловьев А.Б., Кухарук Н.С., Крымская О.В., Нарожняя А.Г., Терехин Э.А., Березуцкий В.Д., Голотвин А.Н., Сарапулкин В.А., Сарапулкина Т.В., Федюнин И.В., Польшина М.А., Митрайкина А.М., Калугина С.В., Полякова Т.А., Белванцев В.Г., Вагурин И.Ю., Толстопятова О.С., Борбукова Д.А., Тимащук Д.А., Дудин Д.И., Дудина Е.В., Тарубарова А.Н., Смирнов Г.В., Кухарук С.А., Тимошенко А.И., Тимохов И.С. Почвы и растительность юга Среднерусской возвышенности в условиях меняющегося климата. Белгород: БелГУ, 2016. 326 с.
5. Разумов В.В., Иванов А.Л., Савин И.Ю., Шаповалов Д.А., Разумова Н.В., Беккиев М.Ю., Шагин С.И., Молчанов Э.Н., Козлов Д.Н. Переувлажнение и подтопление земель в регионах России. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2018. 280 с.
6. Разумов В.В., Молчанов Э.Н., Глушко А.Я., Разумова Н.В. К проблеме подтопления земель на юге Европейской части России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2014. № 73. С. 3—28.

7. 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.
8. Чевердин Ю.И. Изменение свойств почв Юго-Востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия. Воронеж: Истоки, 2013. 334 с.
9. Sun A.Y. Predicting groundwater level changes using GRACE data // *Water resources research* // 2013. Vol. 49. Pp. 5900—5912.
10. Longuevergne L., Wilson C.R., Scanlon B.R., Crétaux J.F. GRACE water storage estimates for the Middle East and other regions with significant reservoir and lake storage // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2012. Vol. 9. № 10. Pp. 11131—11159. doi: 10.5194/hessd-9-11131-2012
11. Banerjee Ch., Kumar D.N. Identification of prominent spatio-temporal signals in grace derived terrestrial water storage for India // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. Vol. 40. № 8. P. 333. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-8-333-2014
12. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Харламов М.А. Использование спутниковой системы измерения поля гравитации земли (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 4. С. 27—34.
13. 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. 7—16.
14. Киселев А.В., Горный В.И., Крицук С.Г., Тронин А.А. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 6. С. 13—28. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28
15. Савин И.Ю., Марков М.Л., Овечкин С.В., Исаев В.А. Тренд общей обводненности европейской части России, выявленный по спутниковым данным GRACE // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2016. № 82. С. 28—41.
16. 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. No 30. Pp. 205—230. doi: 10.1029/98JB02844
17. 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. Pp. 1—4.
18. Swenson S.C., Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // *Geophys. Res. Lett.*, 2006. Vol. 33. № 3. L08402. doi:10.1029/2005GL025285
19. Landerer F.W., Swenson S.C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // *Water Resources Research*. 2012. Vol 48. W04531. 11 PP. doi: 10.1029/2011WR011453

References

1. Shnitnikov AV. *Vnutrivekovaya izmenchivost' komponentov obshchei uvlazhnennosti*. [Intra-Century variability of components of General humidification]. Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ.; 1969. (In Russ).
2. Savin IY. Reaction of the soil cover to Helio-geophysically determined climate fluctuations. *Geography and Natural Resources*. 1993; (3):11—16. (In Russ).
3. Rode AA. Long-term variability of atmospheric precipitation and elements of soils water balance. In: *Izbrannye trudy. Tom 4. Problemy gidrologii pochv* [Selected proceedings. Volume 4. Problems of soil hydrology]. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute Publ.; 2009. p.479—578. (In Russ).
4. Chendev YG, Lebedev MG, Matveev SM, Petin AN, Dolgikh AV, Smirnova LG, et al. *Pochvy i rastitel'nost' yuga Srednerusskoi vozvyshechnosti v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Soil and vegetation of South Central Russian Upland in a changing climate]. Belgorod: Belgorod State University Publ.; 2016. (In Russ).
5. Razumov VV, Ivanov AL, Savin IY, Shapovalov DA, Razumova NV, Bekkiev MY. *Pereuvlazhnenie i podtoplenie zemel' v regionakh Rossii* [Waterlogging and flooding of lands in the regions of Russia]. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute Publ.; 2018. (In Russ).
6. Razumov VV, Molchanov EN, Glushko AY, Razumova NV. Problem of land flooding in the South of the European part of Russia. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2014; (73):3—28. (In Russ).
7. Bazykina GS, Boyko OS. Influence of abnormal weather conditions of the last decades on water regime of typical chernozems of the reserved steppe (Kursk region). *Eurasian Soil Science*. 2008; (7):833—844. (In Russ).
8. Cheverdin YI. *Pereuvlazhnenie i podtoplenie zemel' v regionakh Rossii* [Change of soil properties in the South-East of the Central Chernozem region under the influence of anthropogenic impact]. Voronezh: Istoki Publ.; 2013. (In Russ).

9. Sun AY. Predicting groundwater level changes using GRACE data. *Water resources research*. 2013; 49(9):5900—5912. doi: 10.1002/wrcr.20421
10. Longuevergne L, Wilson CR, Scanlon BR, Crétaux JF. GRACE water storage estimates for the Middle East and other regions with significant reservoir and lake storage. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. 2012. 9(10):11131—11159. doi: 10.5194/hessd-9-11131-2012
11. Banerjee C, Kumar DN. Identification of prominent spatio-temporal signals in grace derived terrestrial water storage for India. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014; 40(8):333. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-8-333-2014
12. Zotov LV, Frolova NL, Grigoriev VY, Kharlamov MA. Using the satellite system for measuring the earth's gravity field (GRACE) to assess the water balance of large river basins. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*. 2015; (4):27—34. (In Russ).
13. Kiselev AV, Muratova NR, Gorny VI, Tronin AA. Relation between available water content in soil and gravity force (from GRACE data). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015; 12(6):7—16. (In Russ).
14. Kiselev AV, Gorny VI, Kritsuk SG, Tronin AA. Indication of dangerous natural phenomena by variations of the Earth's gravitational field (according to satellite surveys by the GRACE system). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016; 13(6):13—28. (In Russ). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28
15. Savin IY, Markov ML, Ovechkin SV, Isaev VA. the Trend of General waterlogging in the European part of Russia revealed by GRACE satellite data. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2016; (82):28—41. (In Russ).
16. Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time-variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998; 103(B12):30205—30229. doi: 10.1029/98JB02844
17. Tapley BD, Bettadpur S, Watkins M, Reigber C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys Res Lett*. 2004; 31(9): L09607. doi: 10.1029/2004GL019920
18. Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys Res Lett*. 2006; 33(8): L08402. doi: 10.1029/2005GL025285
19. Landerer FW, Swenson SC. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*. 2012; 48(4): W04531. doi: 10.1029/2011WR011453

Об авторах:

Савин Игорь Юрьевич — доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, заместитель директора ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Российская Федерация, 109017, г. Москва, Пыжевский переулок, д. 7; профессор, Экологический факультет, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8; e-mail: savin_iyu@esoil.ru
ResearcherID: H-8117-2013
Scopus Author ID: 7003650252
ORCID: 0000-0002-8739-5441

Габдуллин Бахытнур Сартаевич — аспирант, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1; e-mail: gabdullin10.92@mail.ru
Scopus Author ID: 57194509307

About authors:

Savin Igor Yurievich — Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, Dokuchaev Soil Science Institute, 7 Pyzhevsky lane, Moscow, 109017, Russian Federation; Professor, Ecological Faculty, Peoples' Friendship University of Russia, 8 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: savin_iyu@esoil.ru
Researcher ID: H-8117-2013
Scopus Author ID: 7003650252
ORCID: 0000-0002-8739-5441

Gabdullin Bakhytnur Sartavich — PhD student, Geography Department, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory st., Moscow, 119991, Russian Federation; e-mail: gabdullin10.92@mail.ru
Scopus Author ID: 57194509307