УДК. 556.5.06 (556.168)

Р.Г. Джамалов
д-р геол.-мин. наук
профессор
Институт водных проблем РАН[1]
заведующий лабораторией
главный научный сотрудник
roald@iwp.ru

В.Ю. Григорьев
Институт водных проблем РАН
младший научный сотрудник
vadim308g@mail.ru

Н.Л. Фролова
д-р геогр. наук
профессор
МГУ им. М.В. Ломоносова
географический факультет[2]
зав. кафедрой гидрологии суши
frolova_nl@mail.ru

Прогноз речного стока за период летней межени по данным о бассейновых влагозапасах

[1]Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3.
[2]Россия, 119991, Москва, ГСП–1, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет

Проведена оценка возможности использования данных GRACE для прогноза среднемесячных расходов воды крупных рек Европейской части России за летне-осенний период. Показано, что величина бассейновых влагозапасов является более эффективным предиктором для прогноза расхода воды, чем предыдущие расходы воды при заблаговременности прогноза в 2 месяца. Наиболее эффективно использование бассейновых влагозапасов для прогноза стока в бассейнах, где атмосферные осадки во время прогнозного периода не формируют существенного стока

Ключевые слова: прогноз; летняя межень; речной сток; подземный сток; бассейновые влагозапасы; GRACE; Европейская часть России; крупные речные бассейны

*Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ (проекты № 16–55–52008 МНТ_а и № 16–05–00753 А).

Прогноз речного стока за период летне-осенней межени может потребоваться для планирования режима судоходства, величины допустимого водопотребления в сельском хозяйстве, промышленности и коммунально-бытовой сфере. Прогноз величины водного стока служит также неотъемлемой частью прогноза качества воды. Кроме того, речной сток за период летней межени осуществляется в основном за счет

разгрузки подземных вод, и его величина может быть принята за величину возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод в пределах рассматриваемого бассейна [1, 4].

Прогноз величины речного стока (Q_{t2}) на момент времени t_2 возможен при знании стокоформирующего состояния водосбора на момент составления прогноза (t_1) и внешних условий (погоды) на период его заблаговременности. В настоящий момент приемлемый для целей прогноза речного стока прогноз погоды (прежде всего осадков) может быть получен на срок до 7–10 дней. В то же время влияние начальных условий стокоформирующего состояния водосбора может сказываться на протяжении нескольких лет на величине речного стока, и особенно его подземной составляющей, о чем говорят значимые коэффициенты автокорреляции в рядах речного и подземного стока рек Европейской части России (ЕЧР) [3, 5].

Интегральной характеристикой состояния речного водосбора, влияющей на величину речного стока, являются суммарные бассейновые влагозапасы (*TWS*), включающие подземные воды, почвенные воды, поверхностные воды, ледники и снежный покров, не считая содержание влаги в атмосфере. Однозначной связи между речным стоком *Q* и *TWS* не существует, т.к. одна и та же величина влагозапасов (*TWS*) может быть по-разному распределена на водосборе (в речной сети, подземных водах и т.д.). Однако, можно считать справедливым предположение, что *Q* является возрастающей функцией от *TWS*. При некоторых допущениях степенной вид зависимости $Q = f(TWS)$ может быть получен из уравнения кинематической волны для склонового стока. Причем показатель степени может находится в диапазоне от 1,5 до 3 в зависимости от преимущественного типа стекания (1,5 – для турбулентного и 3 – ламинарного). В некотором диапазоне изменения *TWS*, в силу дифференцируемости функции $R(TWS)$, допустимо линейное приближение зависимости Q_{t2} (TWS_{t1}) в виде [8]:

$$Q_{t2} = \alpha \cdot TWS_{t1} + b \qquad (1).$$

Существенную сложность для получения зависимости Q_{t2} (TWS_{t1}) для крупных речных бассейнов представляет нахождение величины *TWS*. Одним из способов ее нахождения, реализуемым в рамках проекта проекте *GRACE* (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), является учет влияния перераспределения водных масс на гравитационное поле Земли. Основой функционирования системы *GRACE* являются 2 спутника, оснащенные микроволновыми дальномерами, звездными камерами, акселерометрами и приемниками сигнала *GPS* [6]. С помощью моделей циркуляции атмосферы и океана, а также динамики земной коры из гравитационного поля Земли получают составляющую, обусловленную изменением *TWS* [2].

Целью данной работы является оценка возможности использования данных *GRACE* для прогноза среднемесячных расходов воды крупных рек ЕЧР за летне-осенний период.

Методы и исходные данные

Источником данных *GRACE* послужил сайт [9], где представлены материалы обработки *GFZ* (Потсдам, Германия), *CSR* (Остин, США), *JPL* (Пасадена, США) за 2002–2017 гг. Значения бассейновых влагозапасов рассчитывались как средние между массивами этих трех центров. Для построения зависимостей R_{t2} (TWS_{t1}) использовались среднемесячные величины *TWS* за май и июнь (TWS_V, TWS_{VI}, индекс – номер месяца). В рядах данных *GRACE* имеются пропуски, что связано с изношенностью батарей на спутниках и возможностью поддерживать необходимое напряжение лишь при определенных параметрах орбиты. Так, отсутствуют данные о *TWS* за май 2012 и 2015 гг., и июнь 2002, 2003, 2011 и 2015 гг.

Поскольку *GRACE* предоставляет лишь изменение величины *TWS*, то возможно рассчитать лишь аномалию величины *TWS* относительно среднего за период измерений, что недостаточно для построения степенной зависимости Q_{t2} (TWS_{t1}). Поэтому *Q* считалось линейной функцией от *TWS* (1). Искалась зависимость *Q* за месяцы с мая (июня) по ноябрь от величины *TWS* в мае (июне) – т.е. $Q_i(TWS_V)$ и $Q_i(TWS_{VI})$, где i – номер месяца.

Для характеристики точности построенных зависимостей использовался коэффициент детерминации (*D*) равный:

$$D = 1 - \sigma^2_{ост.полн.} / \sigma^2_Q \qquad (2),$$

где $\sigma_{ост.полн.}$ – остаточная дисперсии ряда *Q* после вычета из него рассчитанных величин *Q*, а σ^2_Q – дисперсия ряда измеренных *Q*.

В силу коротких рядов наблюдений, рассчитанные величины *D* могут существенно отличаться от истинных. Поэтому мы сравнили полученные по Q_{t2} (TWS_{t1}) величины *D* с таковыми, полученными другим методом, по зависимости расходов воды за месяцы с мая (июня) по ноябрь от величины расходов воды в мае (июне) за аналогичный период Q_{t2} (Q_{t1}). Построение зависимостей расхода воды от его предыдущих значений является простейшим методом прогноза речного стока, требующим еще меньше исходной информации, чем предлагаемый на-

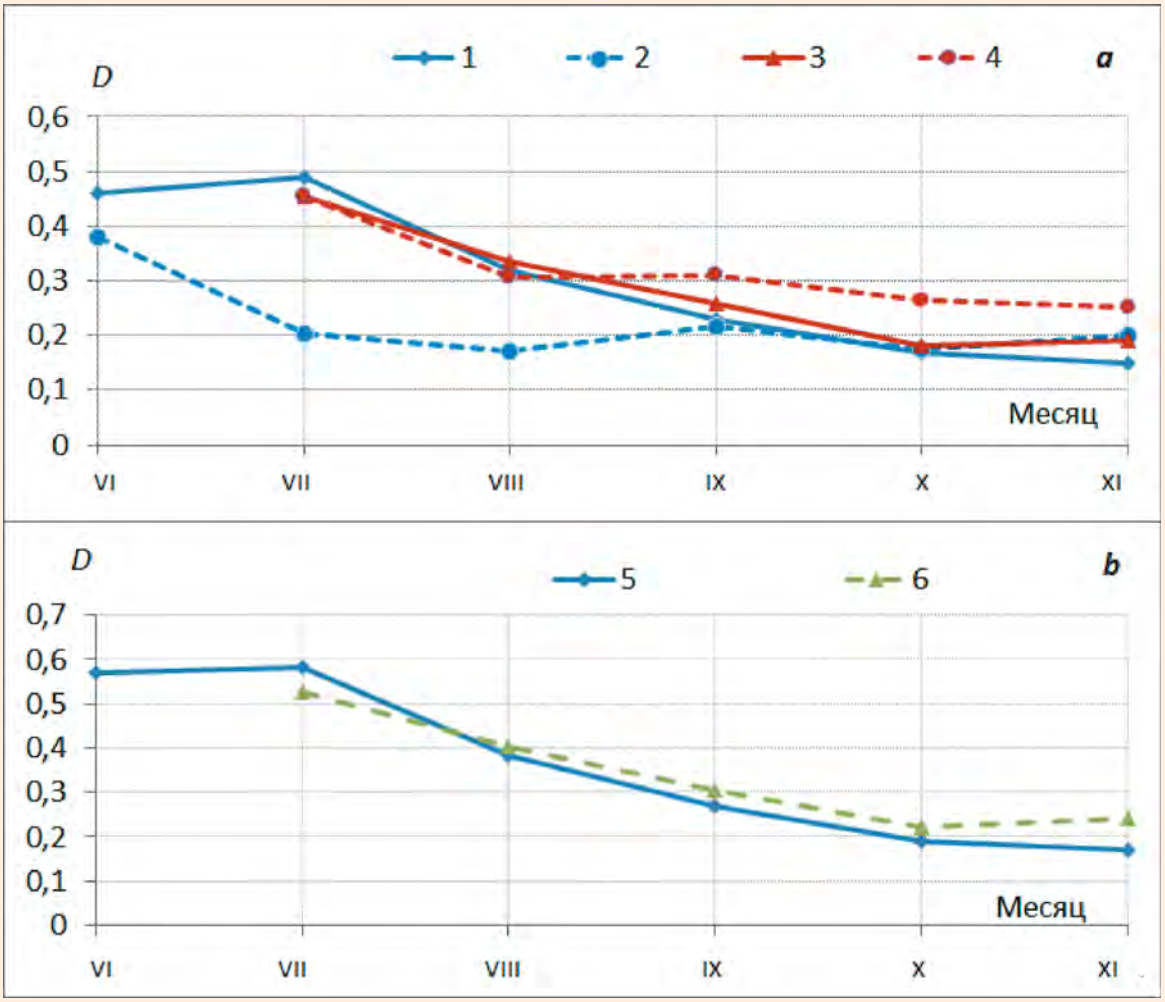

Рис. 1.
Осредненный по 18 водосборам коэффициент детерминации D: a – без учета, b – с учетом ошибки GRACE (1, 5 – средние месячные величины TWS за май, 3, 6 – среднемесячные величины TWS за июнь, 2 и 4 – средние месячные значения расходов воды за май и июнь, соответственно)

ми. В случае если зависимость Q_{t2} (TWS_{t1}) окажется менее точной, чем $Q_{t2}(Q_{t1})$, ее использование нецелесообразно.

Точность полученных зависимостей $Q_{t2}(TWS_{t1})$ зависит не только от тесноты связи между Q_{t2} и TWS_{t1}, но и от точности исходной информации. Для оценки точности *GRACE* мы воспользовались уравнением водного баланса речного водосбора за зимний период. Мы допустили, что ошибка определения расхода воды и испарения, рассчитанного по дефициту влажности воздуха, близка к 0, а ошибка определения слоя осадков не зависит от ошибки *GRACE* и может быть рассчитана согласно [7]. Для 18 рассмотренных в работе водосборов (***табл. 1***) ошибка *GRACE* (σ_{TWS}) колеблется от 11,3 мм до 17,1 мм и в целом убывает с ростом площади водосбора. Считая ошибку *GRACE* независимой от всех остальных источников ошибок зависимости (1), мы можем оценить величину *D* зависимости (1) при условии что $\sigma_{TWS} = 0$:

$$D_{Q(TWS)} = 1 - \left(\sigma^2_{ост.полн.} - \alpha^2 \sigma^2_{TWS}\right) / \sigma^2_Q \qquad (3),$$

где $D_{R(TWS)}$ – дисперсия зависимости (1), при условии что $\sigma_{TWS} = 0$, α – коэффициент регрессии из (1). Величина $D_{Q(TWS)}$ представляет интерес, поскольку показывает, какой точности прогноза Q, по зависимости (1), можно добиться, имея абсолютно точные значения TWS.

Результаты

Осредненный по 18 водосборам ход *D* представлен на ***рис. 1a***.

Практически на всех участках кривых прослеживается уменьшение *D* при росте заблаговременности прогноза. Исключение составляет Q_{VII} (TWS_V), который в среднем более точный, чем Q_{VI} (TWS_V) (***рис. 1a***, синяя кривая). Вероятно, это связано с тем, что время добегания стока от района формирования большей части *TWS* в бассейне до замыкающего створа составляет более 1 месяца. Сток же последующего месяца

Бассейн	площадь, тыс. км^2	май					июнь					
		6	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11
Северная Двина–Абрамково	220	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
Северная Двина–Усть Пинега	350	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
Печора–Оксино	310	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
Мезень–д. Малонисогорская	56,4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Печора–Усть–Цильма	250	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
Ока–Калуга	54,9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ока–Половское	99	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
Ока–Муром	190	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
Ока–Горбатов	240	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Белая–Уфа	100	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0
Белая–Бирск	120	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
Вятка–Киров	48,3	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
Вятка–Котельнич	72	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Вятка–Аркуль	96,9	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0
Вятка–Вятские Поляны	120	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
Дон–Лиски	69,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Дон–Казанская	100	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
Дон–Беляевский	200	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1

Таблица 1.
Сравнение точности прогноза месячного стока по зависимости $Q_{t2}(TWS_{t1})$ и $Q_{t2}(Q_{t1})$, по данным за май и июнь (1 – прогноз по зависимости $Q_{t2}(TWS_{t1})$ лучше, чем $Q_{t2}(Q_{t1})$)

формируется влагозапасами, расположенными ближе к выбранному створу, чей вклад в изменчивость *TWS* на всем бассейне не так велик. Подобное не наблюдается для зависимости от расхода в мае (Q_{VI} (Q_{VII}) и $Q_{VII}(Q_V)$), т.к. величина расхода характеризует запасы воды в русле именно в районе замыкающего створа. Отметим, что связь стока за летние месяцы тесней с *TWS* в мае, чем с *Q* в мае. Такое соотношение отражает слабую связь между величинами меженного стока и расходов за половодье, имеющих различный генезис. Точность прогнозов стока за июль-август, по данным за июнь как по *Q*, так и по *TWS* мало отличается.

Наибольшая точность прогноза по *TWS* характерна для бассейна Дона, где она при заблаговременности в 2 месяца составляет 0,7–0,8 в зависимости от створа. Наименее тесные связи наблюдаются в бассейне Вятки, *D* = 0,1–0,4. Однако в этом же диапазоне лежит величина *D* для зависимости от расхода воды, что говорит о возможности ошибок в исходной информации. Для р. Белой для прогноза с заблаговременностью два месяца *D* составляет 0,5–0,7. Однако при заблаговременности более двух месяцев *D* уменьшается до 0,1–0,2, т.е. становится практически незначим. В среднем для бассейна Оки для $Q_{VII}(TWS_V)$ *D* составляет 0,4, а для $Q_{VIII}(TWS_{VI})$ – около 0,6. Для бассейнов северных рек величины *D* более 0,2 при заблаговременности прогноза не более 2 месяцев при использовании *TWS* за май и не более 1 месяца при использовании *TWS* за июнь. В целом прослеживается ухудшение качества прогнозов с юга на север. Это может быть связанно с двумя причинами. Во-первых, с юга на север растет вклад летних осадков в формирование стока. Во-вторых, за 2002–2015 гг. на южной половине ЕЧР (особенно в бассейне Дона) наблюдались как периоды повышенной, так и пониженной водности, т.е. имел место больший размах колебаний *TWS* и *Q*, чем на севере.

Оценка ошибок полученных зависимостей за вычетом вклада ошибки данных *GRACE*, $D_{Q(TWS)}$ (3), показывает, что в среднем при наличии точных значений *TWS* коэффициент детерминации полученных зависимостей был бы на 0,1 больше, при заблаговременности в 1 месяц. С ростом заблаговременности прогноза разница становится менее существенной. Таким образом, достичь существенного улучшения точности прогноза лишь за счет роста точности данных о *TWS*, не удастся.

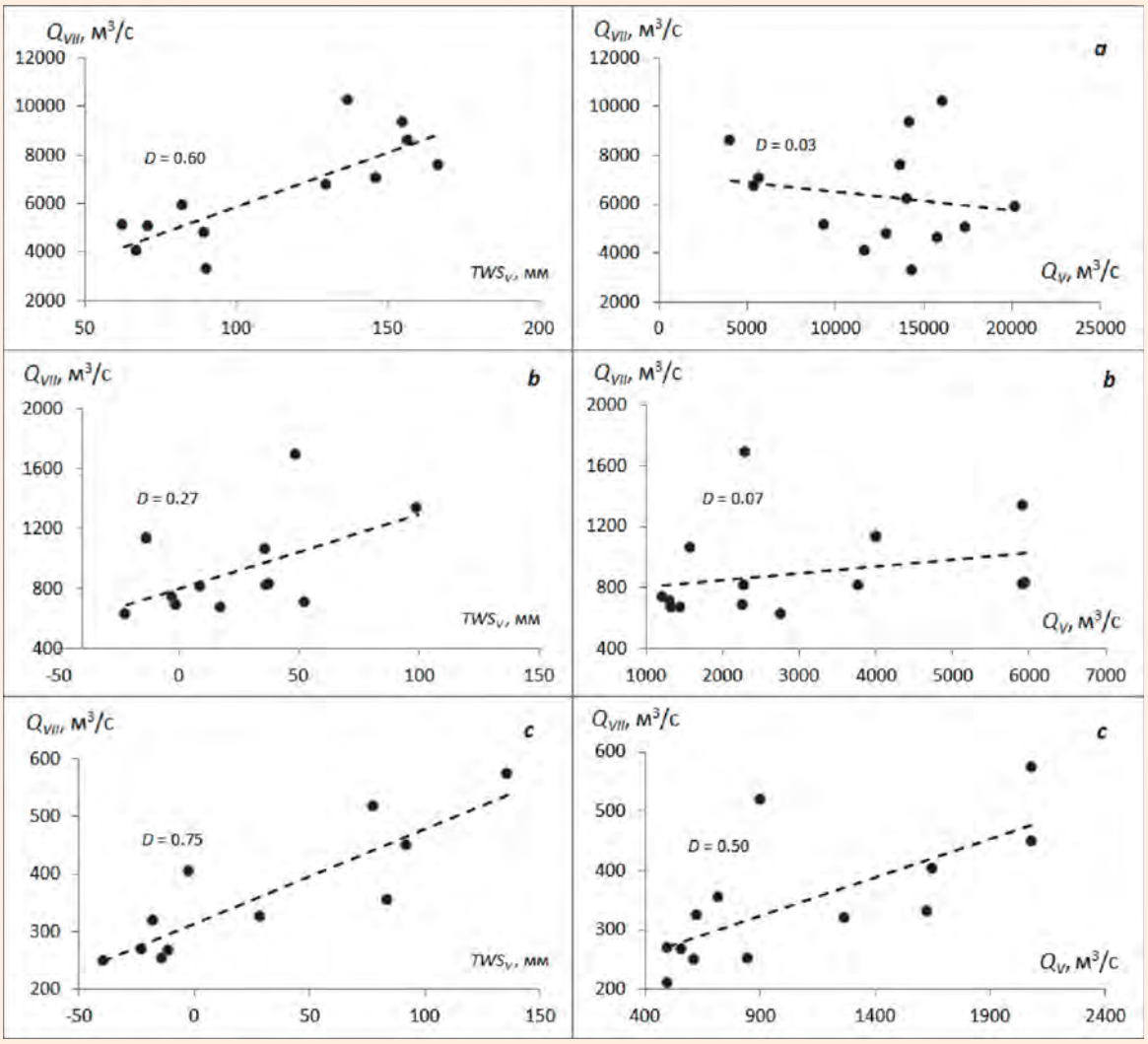

Рис. 2.
Графики связи расходов воды в июле Q_{VII} (м³/с) с бассейновыми влагозапасами в мае TWS_V (мм) (слева) и расходами воды в мае Q_V (м³/с) (справа) для бассейнов р. Печоры-Оксино (a), р. Оки-Горбатов (b) и р. Дон-Беляевский (c)

Сравнение точности прогноза по $Q_{t2}(TWS_{t1})$ и $Q_{t2}(Q_{t1})$ (***табл. 1***) показало, что зависимость $Q_{t2}(TWS_{t1})$ показывает себя лучше $Q_{t2}(Q_{t1})$ при прогнозе по данным за май. Также $Q_{t2}(TWS_{t1})$, по сравнению с $Q_{t2}(Q_{t1})$, дает более точные результаты при заблаговременности прогноза в 2 месяца. При росте заблаговременности зависимость $Q_{t2}(Q_{t1})$ начинает показывать лучшие результаты.

Стоит отметить, что в силу малого количества точек, по которым строились зависимости (***рис. 2***), даже при высоких значениях *D* достоверность ее невысока

Выводы

Для значительной части крупных речных бассейнов на ЕЧР прогнозы последующих расходов воды по их связи (зависимость $Q_{t2}(TWS_{t1})$) с суммарными бассейновыми влагозапасами позволяют точнее рассчитывать сток летне-осеннего периода при заблаговременности прогноза в 2 месяца. Наиболее эффективно использование *TWS* для прогноза стока в бассейнах, где атмосферные осадки во время прогнозного периода не формируют существенного стока. В то же время, учитывая небольшую длину рядов предикторов стока, точность полученных зависимостей невелика. Кроме того, повышение точности исходных данных *GRACE* для расчета бассейновых влагозапасов (*TWS*) к повышению точности прогноза меженного и минимального стока не приведет. Поэтому в дальнейшем при использовании *TWS* в прогнозах речного стока требуется совершенствование применяемых методов и разработка более адекватных и возможно сложных подходов с использованием гидролого-гидрогеологические моделей.

Литература

1. Боревский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? //Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 10–16.
2. Булычев А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Применение данных спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для изучения и оценки гидролого-гидрогеологических характеристик крупных речных бассейнов //Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 5. С. 514–522.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС. 2015. 315 с.
4. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М.И. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод европейской части России //Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 571–589.
5. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Высотно-пространственный и пространственно-временной анализ водного баланса европейской части России // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 134–149.
6. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Харламов М.А. Использование спутниковой системы измерения поля гравитации (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов //Вестник МГУ. Серия География. 2015. № 4. С. 27–33.
7. Кислов А.В., Китаев Л.М., Константинов И.С. Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова //Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 98–104.
8. Фролов А.В. Дискретная динамико-стохастическая модель многолетних колебаний речного стока //Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 538–547.
9. JPL GRACE data. Avialable at: https://grace.jpl.nasa.gov/data/grace-months/ (accessed 19 June 2017).

UDC 556.5.06 (556.168)

R.G. Dzhamalov, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of Laboratory of Water Problems Institute of RAS[1], roald@iwp.ru
Grigorev V.Yu., junior researcher of of Water Problems Institute of RAS[1], vadim308g@mail.ru
N.L. Frolova, Doctor of Geographical Sciences, Head of Department of Land Hidrology of Geography faculty of Lomonosov Moscow State University[2], frolova_nl@mail.ru

[1]3 Gubkin str., Moscow, 119333, Russia.
[2]Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, GSP–1, Moscow, 119991, Russia.

Prediction of Streamflow in the Summer Runoff Low Period Using Data on Moisture Content in the Basin

Abstract. The paper presents an assessment of water discharge prediction accuracy for summer and autumn runoff low period on the basis of linear regression equation using water storage data in the basin at the beginning of the period. Calculations were carried out for 18 stations on free–flowing rivers in European Russia; measurements of water discharge and moisture content calculated using the GRACE Project values for the years 2002–2015 were used in this work. The GRACE data error obtained on the basis of the water–balance equation made 11 to 17 mm. The average coefficient of regression dependences determination with a lead time of one month was about 0.45 with a minimum in the Vyatka River basin (0.1 to 0.4) and a maximum in the Don River basin (0.7 to 0.8). It is shown that for the most river stations (17 or 15 depending on the choice of beginning date of low water) with a lead time of two months, forecast of water discharge is more accurate based on basin moisture content data than according to the previous water discharge data. Estimation of contribution of basin moisture content error to the forecast accuracy showed that coefficient of regression dependences determination in its absence would increase by an average of 0.1. Therefore, the amount of previous moisture content of a basin for the base runoff can be a more reliable predictor than the amount of previous water discharges. However, it is likely that improving the accuracy of the initial data with no changes in the forecast methodology will result in a significant improvement in the forecast quality

Keywords: forecast; summer low-flow period; river flow; groundwater flow; terrestrial water storage; GRACE; European Russia; large watersheds.

References

1. Borevskij B.V., Markov M.L. *Javljaetsja li mezhennyj rashod rek meroj pitanija podzemnyh vod ili obshhego podzemnogo stoka?* [Is low-flow river flow a measure of groundwater recharge or total groundwater flow?]. *Razvedka i ohrana nedr* [Exploration and protection of mineral resources], 2014, no. 5, pp. 10–16.
2. Bulychev A.A., Dzhamalov R.G., Sidorov R.V. *Primenenie dannyh sputnikovoj sistemy izmerenija polja gravitacii Zemli (GRACE) dlja izuchenija i ocenki gidrologo-gidrogeologicheskih harakteristik krupnyh rechnyh bassejnov* [Application of data from the satellite system for measuring the gravity field of the Earth (GRACE) to study and assess the hydrological and hydrogeological characteristics of large river basins]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2012, vol. 39, no. 5, pp. 514–522.
3. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. i dr. *Sovremennye resursy podzemnyh i poverhnostnyh vod Evropejskoj chasti Rossii: formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* [Modern resources of groundwater and surface waters of the European part of Russia: the formation, distribution, use]. Moscow, GEOS Publ., 2015, 315 p.
4. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Krichevec G.N., Safronova T.I., Kireeva M.B., Igonina M.I. *Formirovanie sovremennyh resursov poverhnostnyh i podzemnyh vod evropejskoj chasti Rossii* [Formation of modern surface and groundwater resources in the European part of Russia]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2012, vol. 39, no. 6, pp. 571–589.
5. Dolgov S.V., Koronkevich N.I. *Vysotno-prostranstvennyj i prostranstvenno-vremennoj analiz vodnogo balansa evropejskoj chasti Rossii* [Altitudinal and spatial-temporal analysis of the water balance of the European part of Russia]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2010, vol. 37, no. 2, pp. 134–149.
6. Zotov L.V., Frolova N.L., Grigor'ev V.Ju., Harlamov M.A. *Ispol'zovanie sputnikovoj sistemy izmerenija polja gravitacii (GRACE) dlja ocenki vodnogo balansa krupnyh rechnyh bassejnov* [Using the satellite gravity field measurement system (GRACE) to assess the water balance of large river basins]. *Vestnik MGU. Serija Geografija* [Bulletin of Moscow State University. Geography Series], 2015, no. 4, pp. 27–33.
7. Kislov A.V., Kitaev L.M., Konstantinov I.S. *Statisticheskaja struktura krupnomasshtabnyh osobennostej polja snezhnogo pokrova* [Statistical structure of large-scale snow cover features]. *Meteorologija i gidrologija* [Meteorology and Hydrology], 2001, no. 8, pp. 98–104.
8. Frolov A.V. *Diskretnaja dinamiko-stohasticheskaja model' mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka* [Discrete dynamic-stochastic model of perennial fluctuations in river flow]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2011, vol. 38, no. 5, pp. 538–547.
9. JPL GRACE data. Avialable at: https://grace.jpl.nasa.gov/data/grace-months/ (accessed 19 June 2017).