УДК [556.16 + 556.132.2]:556.06«45»

СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА НОРМЫ ИЗМЕНЕНИЙ СУММАРНЫХ ВЛАГОЗАПАСОВ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

Е.В. Гайдукова, А. Баймаганбетов, Л. Синкпеун, Э.С. Бонгу

Российский государственный гидрометеорологический университет, oderiut@mail.ru

Рассматривается методология долгосрочного прогнозирования вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения, а также возможность получения в рамках этой методологии сценарных оценок изменения суммарных влагозапасов речных бассейнов с учетом влияния меняющегося климата. В основе методологии лежит уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова, которое аппроксимируется системой уравнений для начальных статистических моментов. Проведена сценарная оценка статистических моментов речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов водосборов России с использованием ансамблевой модели климатического сценария RCP4.5 на период с 2046 по 2065 г. Получено, что изменение климата отразится в основном на речном стоке, а статистические характеристики испарения и норма изменений суммарных влагозапасов под влиянием климата изменятся мало. Предлагаемый метод предназначен для возможного интерфейса гидрологических прогнозов и водозависимых отраслей экономики.

Ключевые слова: речной сток, испарение, норма изменений суммарных влагозапасов, климатический сценарий, уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова.

SCENARIO ESTIMATION OF THE NORM OF CHANGES IN THE TOTAL MOISTURE RESERVES OF RIVER BASINS

E.V. Gaidukova, A. Baimaganbetov, L. Sinkpehoun, E.S. Bongu

Russian State Hydrometeorological University

The methodology of long-term forecasting of probabilistic characteristics of long-term river flow and evaporation is considered, as well as the possibility of obtaining scenario estimates of the rate of change in the total moisture reserves of river basins within the framework of this methodology, taking into account the influence of a changing climate. The methodology is based on the Fokker—Planck—Kolmogorov equation, which is approximated by a system of equations for the initial statistical moments. A scenario assessment of the statistical moments of the river flow, evaporation and rate of change of the total water reserves of the catchments of Russia using the ensemble model of the climate scenario RCP4.5 for the period from 2046 to 2065 was carried out. It was found that climate change will mainly affect the river runoff, and the statistical characteristics evaporation and the rate of change of total water reserves under the influence of climate will change little. The proposed method is intended for a possible interface of hydrological forecasts and water-dependent sectors of the economy.

Keywords: river runoff, evaporation, rate of change of total moisture reserves, climate scenario, Fokker—Planck—Kolmogorov equation.

Введение

Разработка методики долгосрочной оценки изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов основана на трех предпосылках.

Первая предпосылка заключается в следующем. При годовом осреднении уравнение водного баланса имеет вид $\dot{X} = Q + E \pm \Delta U$. В правой части уравнения находятся речной сток (Q), испарение (E) и изменение суммарных влагозапасов в речном бассейне (ΔU), т. е. три взаимодействующие фазовые переменные.

Взаимодействие между переменными Q и E относят к типу конкуренции за ресурс — осадки $\dot{X}$, и динамика каждой из них описывается линейным формирующим фильтром [7]

$$\frac{dY_i}{dt} = -\left(\frac{1}{k_{Y_i}\tau_{Y_i}}\right)Y_i + \frac{\dot{X}}{\tau_{Y_i}}, \quad i = 1,\ 2, \tag{1}$$

или, после добавления случайных шумов, стохастическим уравнением

$$\sum_{i=1}^{2}\left[\overline{c}_{ij}(t) + \tilde{c}_{ij}(t)\right]\varphi\left(\vec{Y}\right) + \overline{N}_i(t) + \tilde{N}_i(t), \tag{2}$$

где $Y_1 = Q$, $Y_2 = E$; k_{Y_i} и τ_{Y_i} — коэффициент стока (испарения) и время релаксации для стоковой и испарительной областей речного бассейна; $\overline{c}_{ij}$ и $\overline{N}_i$ — математическое ожидание задаваемых мультипликативных (c_{ij}) и аддитивных (N_i) параметров, характеризующих свойства бассейна и внешнего воздействия; $\tilde{c}_{ij}$ и $\tilde{N}_i$ — гауссовские коррелированные шумы задаваемых параметров; $\varphi\left(\vec{Y}\right)$ — функция вектора фазовых координат (Q, E).

От линейного формирующего фильтра (2) переходим к уравнению Фоккера — Планка — Колмогорова, а дальше к системе уравнений для начальных статистических моментов, которая является основой метода сценарной оценки последствий изменения климата для стока или испарения либо совместной их оценки (через двумерные плотности вероятности) [3].

Второй предпосылкой для исследования стало обнаружение явления ненулевой нормы изменений суммарных влагозапасов при многолетнем осреднении (см., например, [4, 14]), т. е. выявлено, что норму изменений суммарных влагозапасов следует учитывать в определенных районах при оценке долгосрочных климатических изменений в речных бассейнах.

В качестве третьей предпосылки выступает полученная зависимость фрактальной размерности от температуры приземного воздуха, диагностирующая регионы, в которых в процессе формирования речного стока принимают участие три фазовые переменные: помимо стока, еще испарение и изменение суммарных влагозапасов (см., например, [10]).

Цель исследования заключается в разработке методики сценарной оценки долгосрочных климатических изменений в речных бассейнах всех составляющих правой части уравнения водного баланса $\overline{\dot{X}} = \overline{Q} + \overline{E} \pm \overline{\Delta U}$ с учетом статистической линеаризации для ΔU.

Методика
сценарной оценки изменения суммарных влагозапасов

Методология оценки долгосрочных изменений годового стока (испарения) базируется на системе дифференциальных уравнений для начальных моментов, которая аппроксимирует уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК) [7]:

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -\left(\bar{c} - 0{,}5\, G_{\text{Л}}\right) m_1 + \bar{N} - 0{,}5\, G_{\tilde{c}\tilde{N}}; \\ dm_2/dt &= -2\left(\bar{c} - G_{\text{Л}}\right) m_2 + 2\bar{N} m_1 - 3\, G_{\tilde{c}\tilde{N}} m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3\left(\bar{c} - 1{,}5\, G_{\text{Л}}\right) m_3 + 3\bar{N} m_2 - 7{,}5\, G_{\tilde{c}\tilde{N}} m_2 + 3 G_{\tilde{N}} m_1; \\ dm_4/dt &= -4\left(\bar{c} - 2\, G_{\text{Л}}\right) m_4 + 4\bar{N} m_3 - 4 \cdot 3{,}5\, G_{\tilde{c}\tilde{N}} m_3 + 6 G_{\tilde{N}} m_2, \end{aligned} \tag{3}$$

где $m_i \left(i = \overline{1,4}\right)$ — начальные статистические моменты; $\bar{c} = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$ (здесь k — коэффициент стока (испарения), τ — время релаксации речного бассейна, $\bar{c}$ — математическое ожидание, $\tilde{c}$ — белый шум); $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ (здесь $\dot{X}$ — интенсивность осадков, $\bar{N}$ — математическое ожидание, $\tilde{N}$ — белый шум); $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ — интенсивность шумов.

Поскольку оцениваются климатические изменения, то принимается $dm_i/dt = 0$, т. е. ограничиваются алгебраической системой и сценарные оценки делаются ступенчато по 20—30 лет. Другим упрощением является игнорирование четвертого момента m_4, который рассчитывается с большой погрешностью. По аналогичной причине вместо прогнозирования m_3 соотношение между коэффициентами асимметрии и вариации в новых климатических условиях оставляют равным значению для текущего климата.

Таким образом, система (3) сводится к двум алгебраическим уравнениям [9]:

$$m_1 = \bar{N}/\bar{c}; \tag{4}$$

$$m_2 = \left(G_{\tilde{N}} + 2\bar{N} m_1\right)/2\bar{c},$$

которое параметризируется только двумя константами ($\bar{c}$ и $G_{\tilde{N}}$). Параметр $\bar{c}$ связывают со сценарными температурой воздуха и количеством осадков эмпирическими формулами.

В отличие от стока и испарения изменения суммарных влагозапасов речного бассейна нельзя описать линейным формирующим фильтром (2).

Модель для ΔU применительно к гидрологии записывается в следующем виде [7]:

$$\frac{d\Delta U}{dt} = \frac{\left(\dot{X} - Q - E - c\,\text{sign}\left(X - Q - E\right)\right)}{\tau_{\Delta U}}, \tag{5}$$

где $\operatorname{sign}\left(\dot{X}-Q-E\right)$ — знаковая функция; c — скорость накопления (отдачи) влаги в почвогрунтах; $\tau_{\Delta U}$ — время релаксации почвогрунтов; $\left(\dot{X}-Q-E\right)\sim\Delta U$.

Знаковая функция, входящая в уравнение (5), является существенно нелинейной, т. е. методология получения вероятностного уравнения, применяемая для стока и испарения, не подходит.

Линеаризация уравнения (5) и введение в него случайных шумов приводит к модели линейного формирующего фильтра типа (2). Таким образом, открывается возможность моделировать изменение суммарных влагозапасов, не выходя за рамки распределений Пирсона.

В работах академика В.С. Пугачева и его учеников [1, 5, 6, 13] на примерах рассматривается статистическая линеаризация. Ее суть в общем случае для произвольной случайной функции нелинейного элемента $Y=\varphi\left(X\right)$ сводится к представлению выходной величины приближенной зависимостью:

$$Y\left(t\right)\approx\varphi_0+\mu X^0\left(t\right), \tag{6}$$

где φ_0 и μ — параметры статистической линеаризации; $X^0(t)$ — центрированное значение входного воздействия на нелинейный элемент.

Далее находим значения величин φ_0 и μ путем минимизации среднего квадрата α погрешности аппроксимации (6), т. е. $\alpha=\mathrm{M}\left[\left(Y-\varphi_0-\mu X\right)^2\right]$.

Приходим к системе из двух уравнений:

$$\begin{gathered}\varphi_0-\mathrm{M}\left[Y\right]=0,\\ -\mathrm{M}\left[YX^0\right]+\mu\mathrm{D}\left[X\right]=0,\end{gathered} \tag{7}$$

где $\mathrm{M}[Y]$ — математическое ожидание выходной величины Y; $\mathrm{D}\left[X\right]=\mathrm{M}\left[\left(X-\mathrm{M}\left[X\right]\right)^2\right]$ — дисперсия входного воздействия на нелинейный элемент (т. е. в нашем случае $\dot{X}-Q-E$).

После определения параметров статистической линеаризации и задания внешнего воздействия получаем

$$Y\left(t\right)=\varphi_0\left(\mathrm{M}\left[X\right],\mathrm{D}\left[X\right]\right)+\mu\left(\mathrm{M}\left[X\right],\mathrm{D}\left[X\right]\right)X^0\left(t\right). \tag{8}$$

Выражения для $\varphi_0(\mathrm{M}[X], \mathrm{D}[X])$ и $\mu([\mathrm{M}[X], \mathrm{D}[X])$ приводятся в научно-технической литературе для всех видов основных нелинейностей (см. [1, 5, 6, 13]). Для функции $c\operatorname{sign}(x)$ они имеют следующий вид:

$$\varphi_0=2c\Phi\left(\frac{\mathrm{M}\left[X\right]}{\sqrt{\mathrm{D}\left[X\right]}}\right);\qquad\mu=\frac{2c}{\sqrt{\mathrm{D}\left[X\right]2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{M}\left[X\right]}{\sqrt{\mathrm{D}\left[X\right]}}\right)^2},$$

где $\Phi(z)=\frac{1}{2\pi}\int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}}dt$ — табличная функция Крампа (интеграл вероятности).

Линеаризованное уравнение для изменения суммарных влагозапасов будет иметь вид

$$\dot{Y}=-(\bar{c}-\tilde{c})(\varphi_0+\mu X^0)+\bar{N}+\tilde{N}, \tag{9}$$

где $X=\dot{X}-Q-E$; $N=X/\tau$.

Дальше можно действовать отработанным на стоке и испарении способом, и для установившегося режима изменения суммарных влагозапасов ($\partial p(\Delta U)/\partial t=0$) уравнение ФПК будет иметь вид

$$B\frac{\partial p}{\partial \Delta U}=-p\frac{\partial B}{\partial \Delta U}+2Ap, \tag{10}$$

где A и B — коэффициенты сноса и диффузии, которые описываются выражениями

$$A(\Delta U)=-\left(\bar{c}-\frac{1}{2}G_{\tilde{c}}\right)\varphi_0-\mu\left(\bar{c}-\frac{1}{2}\mu G_{\tilde{c}}\right)X^0-\frac{1}{2}\mu G_{\tilde{c}\tilde{N}}+\bar{N};$$

$$B(\Delta U)=G_{\tilde{c}}(\varphi_0+\mu X^0)^2-2G_{\tilde{c}\tilde{N}}(\varphi_0+\mu X^0)+G_{\tilde{N}}.$$

Результаты исследований

Для формирования информационно-технологической базы, реализующей апробацию рассмотренной методики сценарной оценки гидрологических последствий изменения климата, были использованы данные 416 пунктов, имеющих ряды наблюдений за годовым стоком рек России и замыкающих зональные площади водосборов. К рядам был применен весь существующий комплекс методик анализа (включающий проверку рядов на однородность, наличие многоводных и маловодных фаз и т. д.) с целью обеспечения допустимости их использования для оценки расчетных гидрологических характеристик, подлежащих картированию. Продолжительность большинства рядов варьируется с 1951 по 2004 г., и от этого периода будет даваться прогноз.

Информация по осадкам была взята из работы [15]. Суммы годовых осадков, которые предоставляются в виде значений, отнесенных к узлам географической сетки, были пересчитаны для центров водосборов расчетных пунктов как средневзвешенные значения. Длина рядов осадков соотносится с продолжительностью рядов речного стока.

Вычисление изменений суммарных влагозапасов за каждый год для текущего климата производилось остаточным методом (с помощью гидрометеорологических рядов по уравнению водного баланса), в котором испарение определялось независимым от Q и X способом — по номограмме Константинова,

аппроксимированной аналитической зависимостью. Правомерность использования номограммы Константинова рассмотрена в работе [12]. Показано, что погрешность определения годовых значений испарения не превосходит 16 %.

В качестве климатического сценария использовался сценарий RCP4.5 и ансамблевая (assemble) модель, имеющаяся в свободном доступе [16]. Применение данной модели рекомендуется экспертами по изменению климата [11]. Климатическая информация представляется в виде норм температуры воздуха и осадков на определенные периоды. Был выбран период с 2046 по 2065 г. Сценарные нормы метеорологических характеристик относятся к узлам географической сетки с шагом 1° по широте и долготе.

На основе климатического сценария по приведенной выше методике, выполнена сценарная оценка расчетных характеристик речного стока и испарения. Проведено сравнение прогнозных карт с фактическими и выделены зоны, в которых имеются значимые отклонения ((факт. – прог.)/факт.·100 %) (рис. 1). На рис. 1 белые области выходят за пределы справедливости номограммы Константинова, т. е. в этих бассейнах соотношение значений среднегодовой температуры приземного воздуха и упругости водяного пара не описывается номограммой.

При использовании ансамблевой модели климатического сценария RCP4.5 практически на всей рассматриваемой территории России отклонение по норме годового слоя стока превышает 15 %: прогнозируется, что норма слоя стока будет больше (рис. 1 *а*). Изменение климата не затронет бассейны верхнего и среднего течения рек Оби и Енисея, а также Северо-Западный регион.

Сценарный коэффициент вариации годового слоя стока увеличится для водосборов, расположенных на юге европейской части России (ЕЧР), и уменьшится на севере и на азиатской части России (рис. 1 *б*). Отклонения могут превышать 30 %. Изменения климата не скажутся в средней полосе России.

Норма испарения, согласно ансамблевой модели климатического сценария RCP4.5, на большей части рассматриваемой территории существенно не изменится (рис. 1 *в*). Норма испарения уменьшится в пределах от 20 до 40 % в основном на южных водосборах европейской части России и на территории бассейнов верхнего течения рек Енисея и Лены.

Значимые отклонения коэффициента вариации испарения прогнозируются в бассейнах рек Амура, Лены, Енисея, а также на юге европейской части России (рис. 1 *г*). Отклонения в пределах 20 % будут в средней полосе ЕЧР и в бассейне среднего течения реки Оби.

На рис. 2 показано распределение знака фактических и сценарных значений нормы изменения суммарных влагозапасов речных бассейнов с уровнем достоверности 68,3 %, т. е. когда $|\overline{\Delta U}|$ превышает погрешность вычислений величины $\delta_{\overline{\Delta U}}$, в расчете которой учитываются и значения погрешностей (%) норм составляющих уравнения водного баланса: $\delta_{\overline{X}} \approx 5\ldots7$; $\delta_{\overline{E}} \approx 15$; $\delta_{\overline{Q}} \approx 5$. Белым цветом на рисунке обозначены области, по которым либо не проводились расчеты (по указанным выше причинам), либо значения $\overline{\Delta U}$ можно считать (на рассматриваемом

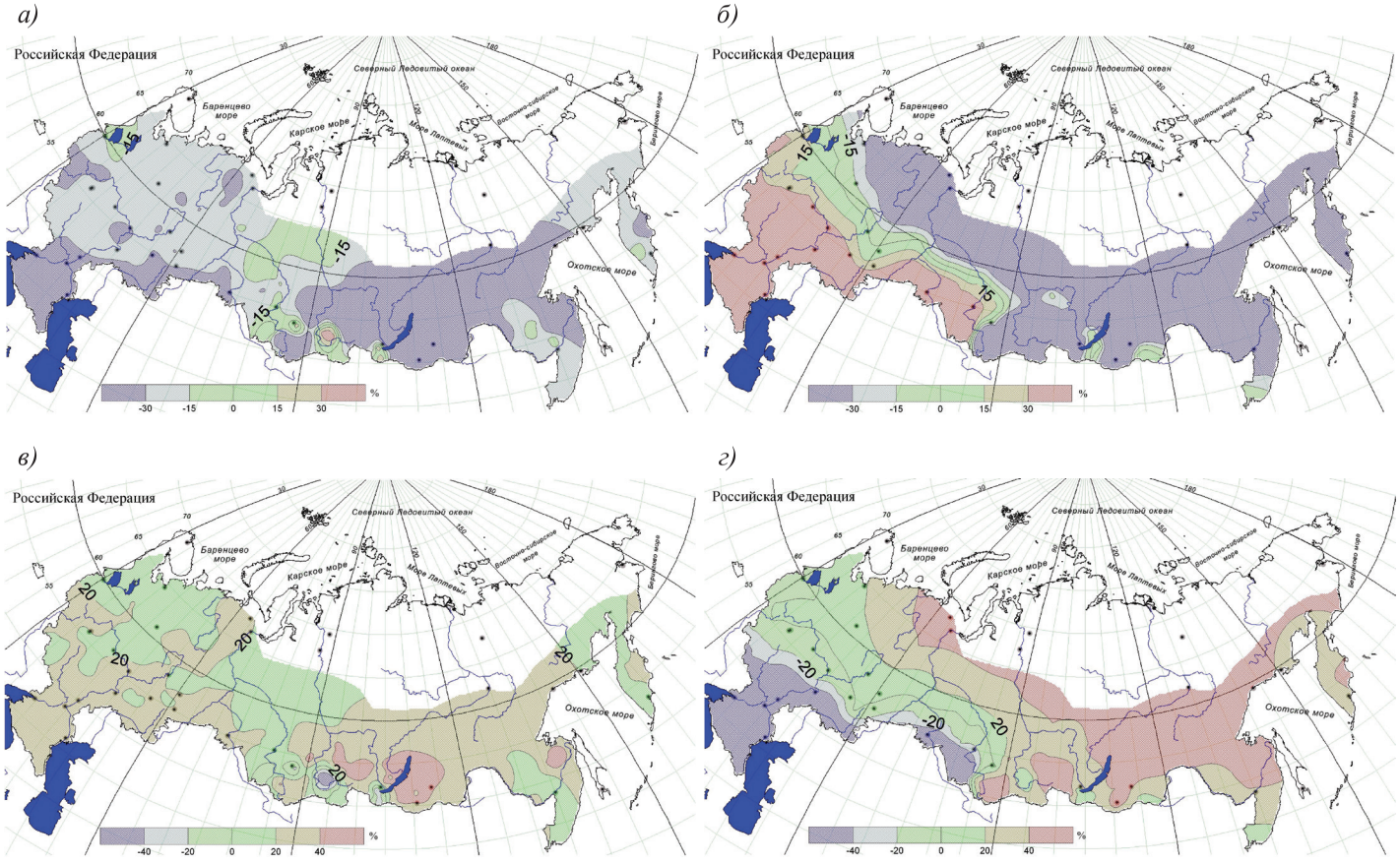

Рис. 1. Отклонение (%) нормы слоя стока (*а*), коэффициента вариации стока (*б*), нормы испарения (*в*) и коэффициента вариации испарения (*г*).

уровне статистической значимости) практически нулевыми. Горные районы на рисунке заштрихованы.

Надежные карты распределения прогнозных значений коэффициентов вариации, а следовательно, и отклонений их от фактических, для ΔU не удалось получить. Отрицательные и большие величины коэффициентов вариации (результат деления среднеквадратического отклонения $\sigma_{\Delta U}$ на норму изменений влагозапасов, стремящуюся к нулю) привносят значимые нюансы в прогнозную методологию, которые предстоит еще учесть при сценарной оценке такой величины как изменение суммарных влагозапасов речных бассейнов. На данном этапе развития методики сценарные величины находились, по сути, по уравнению водного баланса для будущего климатического режима.

Из рис. 2 *б* видно, что нормы ΔU в период 2046—2065 гг. для климатического сценария RCP4.5 и ансамблевой модели будут изменяться в основном в бассейнах

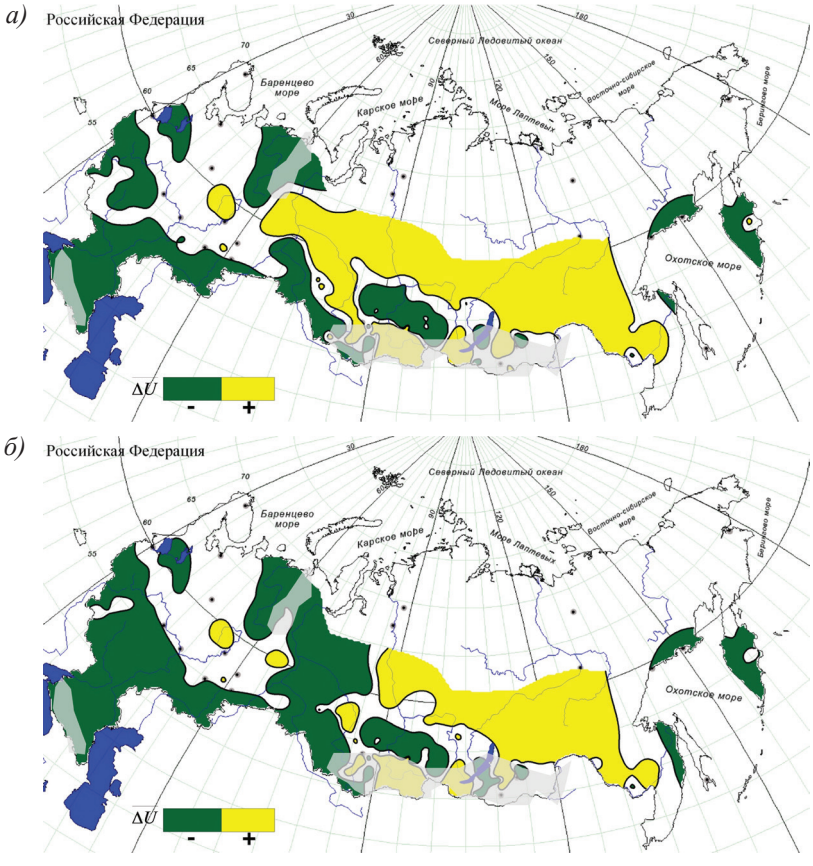

Рис. 2. Распределение знака статистически значимых фактических (*а*) и сценарных (*б*) значений нормы изменения суммарных влагозапасов речных бассейнов на 2046—2065 гг.; уровень достоверности 68,3 %.

европейской части России и в бассейне реки Оби. Причем в последнем норма изменений суммарных влагозапасов поменяет знак с положительного на отрицательный, и, значит, количество осадков при новом климате увеличится.

Полученные карты открывают широкие возможности по оценке чувствительности водозависимых отраслей экономики (гидротехническое строительство, ирригация, гидроэнергетика и т. п.) к возможным климатическим изменениям. Представленная в статье методика не связана с глобальным потеплением или похолоданием — важно наличие самого сценария с необходимыми данными по ожидаемым температуре воздуха и осадкам.

Выводы

В настоящей статье рассмотрена и применена методика сценарной оценки долгосрочных изменений речного стока, испарения и — впервые — изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов.

Получено, что изменение климата отразится в основном на речном стоке. С использованием ансамблевой модели климатического сценария RCP4.5 следует ожидать статистически значимые отклонения прогнозных значений нормы и коэффициентов вариации стока от фактических. Статистические характеристики испарения и норма изменений суммарных влагозапасов под влиянием климата изменятся мало: в среднем для рассматриваемых водосборов норма испарения изменится на 38 %, коэффициент вариации испарения — на 17 %, норма изменения суммарных влагозапасов — на 7 %.

Представленные географические карты распределения отклонений прогнозных значений от фактических характеристик стока, испарения и нормы изменения суммарных влагозапасов позволяют оценивать надежность существующих и проектируемых гидротехнических объектов с точки зрения существующего и ожидаемого гидрологического режима.

Работа финансировалась грантом Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 5.6293.2017/8.9.

Список литературы

1. *Астапов Ю.М., Медведев В.С.* Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. М: Наука, 1982. 304 с.
2. *Гайдукова Е.В., Диавара Х.* Долгосрочная оценка вероятностных распределений многолетнего годового испарения при изменении климата на примере Африканского континента. СПб: изд-во РГГМУ, 2016. 111 с.
3. *Гайдукова Е.В., Шаночкин С.В., Москалюк М.А.* Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 52. С. 80—88.
4. *Голованова Е.Ю.* Статистические характеристики рядов многолетних изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов (на примере России) // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 33. С. 24—30.
5. *Евланов Л.Г., Константинов В.М.* Системы со случайными параметрами. М: Наука, 1976. 568 с.
6. *Казаков И.Е., Мальчиков С.И.* Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М: Наука, 1983. 384 с.

7. *Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В.* Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е, исправ. и доп. СПб: изд-во РГГМУ, 2006. 559 с.
8. *Коваленко В.В.* Речной сток: визуализация многомерных вероятностных распределений. Учебное пособие / Под ред. Е.В. Гайдуковой. СПб: Астерион, 2017. 52 с.
9. *Коваленко В.В., Викторова Н.В. Гайдукова Е.В., Громова М.Н., Хаустов В.А., Шевнина Е.В.* Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. СПб: изд-во РГГМУ, 2010. 51 с.
10. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В.* Влияние климатической нормы приземной температуры воздуха на фрактальную размерность рядов многолетнего речного стока // Доклады РАН. 2011. Т. 439, № 6. С. 815—817.
11. *Кокорин А.О.* Изменение климата 2013: Физическая научная основа. Резюме для лиц, принимающих решения. Доклад Первой рабочей группы Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата. 2013. 51 с.
12. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. Л: Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.
13. *Пугачев В.С., Казаков Н.Е., Евланов Л.Г.* Основы статистической теории автоматических систем. М: Машиностроение, 1974. 400 с.
14. *Viktor V. Kovalenko and Ekaterina V. Gaidukova*. The phenomenon of nonzero norm of long-term changes in the total water supply in river basins // Am. J. Environ. Sci. 2015. V. 11, Is. 2. P. 76—80. DOI: 10.3844/ajessp.2015.76.80
15. National centers for environmental prediction [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.html — NOAA Earth System Research Laboratory, 2018. Дата обращения 20.02.2018.
16. IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ipcc.ch — IPCC Secretariat World Meteorological Organization, 2018. Дата обращения: 21.03.2017.