

# РЕЧНОЙ СТОК В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЛЕНЫ В УСЛОВИЯХ ВЕРОЯТНОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

А. Г. ГЕОРГИАДИ, И. П. МИЛЮКОВА  
*Институт географии РАН, Москва, Россия*  
e-mail: galex50@gmail.com

Results of estimation of river runoff deviations within Lena river basin possible at global climate warming in XXI century caused by growth of the green house gases of anthropogenous origin in atmosphere are submitted. As scenarios of climatic changes results of experiments on global models of the general circulation of atmosphere and ocean, included in the program of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) which primary goal consists in comparison of various scenarios of global climate warming have been used. For estimation of hydrological changes in Lena river basin the macroscale model of monthly water budget developed in Institute of Geography of the Russian Academy of Science [1, 2] is used.

## 1. Модель месячного водного баланса

Начальная версия модели, примененная к крупнейшим речным бассейнам Русской равнины, и ее последующие модификации подробно рассматриваются в [1, 2]. В модели описываются основные процессы гидрологического цикла: инфильтрация и аккумуляция влаги в почве, испарение (на основе модифицированного метода Торнтвайта [3]), аккумуляция воды в снежном покрове и снеготаяние (на основе метода В.Д. Комарова [4]), формирование поверхностного и подповерхностного подземного стока в реки и полного речного стока. Модель позволяет учесть макромасштабные неоднородности гидрометеорологических полей и других характеристик территории. Такой подход обеспечивает необходимую степень надежности моделирования изменений речного стока. В модели месячного водного баланса изменения речного стока и других элементов водного баланса в речных бассейнах оцениваются в узлах регулярной сетки, что облегчает стыковку с данными экспериментов на моделях климата.

При разработке модели применительно к условиям многолетнемерзлых почвогрунтов предполагалось, что процесс формирования стока в общем виде можно представить следующим образом. В холодное время года осадки выпадают в твердом виде (снег) и накапливаются. Верхние слои почвогрунтов при отрицательных температурах воздуха промерзают, образуя практически водонепроницаемый слой. При положительных температурах начинаются снеготаяние и сезонное протаивание почвогрунтов. Осадки и талые

воды, попадая на поверхность водосбора, частично испаряются с поверхности, остальная часть просачивается в верхний талый слой почвогрунтов, мощность которого постепенно увеличивается по мере оттаивания грунта. Часть воды просачивается в нижележащие горизонты подземных вод. Если происходит насыщение почвогрунтов активного слоя до наименьшей влагоемкости, то из излишков влаги формируется быстрый сток (главным образом поверхностный сток и сток из активного слоя надмерзлотной зоны). Влага, просочившаяся в подземные водоносные горизонты, перераспределяясь, идет на формирование стока из них и фильтруется в более глубокие водоносные горизонты вне зоны активного водообмена.

Модель основана на уравнении среднесезонного месячного водного баланса речных водосборов, которое в самом общем виде для каждого расчетного узла регулярной сетки может быть записано следующим образом:

$$Q_s(t) + Q_{gr}(t) = P(t) - E(t) - I_d(t) - dW/dt,$$

где  $Q_s(t)$  — сумма поверхностного и подповерхностного (из сезонно-талого слоя) стока, мм;  $Q_{gr}(t)$  — сток из подземного горизонта, мм. Сумма  $Q_s(j)$  и  $Q_{gr}(t)$  составляет полный речной сток;  $P(t)$  — атмосферные осадки, мм;  $E(t)$  — испарение, мм;  $I_d(t)$  — фильтрация воды в глубокие горизонты подземных вод вне зоны активного водообмена, мм;  $dW/dt$  — изменение запаса воды в зоне активного водообмена речного бассейна на момент времени  $t$ , мм.

Для расчетов водного баланса в бассейне реки Лены ряд блоков модели был модифицирован применительно к условиям многолетнемерзлых грунтов, а также подготовлены блоки для расчетов сезонного протаивания (промерзания) почвогрунтов. В этой версии модели используются две принципиально различные схемы: одна из них позволяет оценить динамику сезонного оттаивания-промерзания активного слоя многолетнемерзлых грунтов, и, соответственно, в другой схеме, используемой для районов, в которых отсутствуют многолетнемерзлые грунты, рассчитываются динамика глубины сезоннопромерзающего слоя почвогрунтов и ее влияние на формирование стока.

Для расчета перемещения границы оттаивания (промерзания) использовано уравнение [5, 6]

$$Z^j = St^j + \left\{ (St^j + Z^{j-1})^2 + 2\lambda_t T_p^j (\Delta t / \rho_v L W_z^j) \right\}^{1/2},$$

где  $Z^j$  — глубина границы протаивания в  $j$ -е сутки;  $L$  — удельная теплота плавления льда;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности мерзлых (при промерзании) и талых (при оттаивании) почвогрунтов;  $\lambda_c$  — коэффициент теплопроводности снега;  $H$  и  $T_p$  — соответственно высота снежного покрова и температура подстилающей поверхности за рассматриваемый интервал времени;  $A_k$  — параметр;  $W_z$  — объемная влажность почвогрунта на фронте протаивания (в долях от 1);  $\rho_v$  — плотность воды.

При расчетах перемещения границы промерзания почвогрунтов  $St^j = (\lambda/\lambda_c)H^j$ , при расчетах перемещения границы оттаивания почвы  $St^j = \lambda/A_k$ .

При отсутствии снежного покрова задавалась зависимость между температурой воздуха и температурой почвы с учетом фактора вечной мерзлоты. Исходя из имеющихся данных наблюдений можно задать, что

$$T_p^j = T^j k_t, \quad k_t = 1.0 \sim 1.3,$$

где  $T$  — среднесуточная температура воздуха.

Коэффициент теплопроводности талых и мерзлых пород рассчитывался из соотношения [5]

$$\lambda_m = k_p(j_{sk} + 0.1W - 1.1) - 0.1W,$$

где  $j_{sk}$  — удельный вес скелета почвогрунта, г/см;  $k_p = 1.5 \dots 1.7$  для песков,  $k_p = 1.4 \dots 1.5$  для супесей,  $k_p = 1.3 \dots 1.4$  для суглинков и глин (первая цифра для талых почвогрунтов, вторая — для мерзлых);  $W$  — объемная влажность почвы, %;  $\lambda_c = 4.32 + 1.64\rho_c + 518.4\rho_c^4$ ,  $\rho_c$  — плотность снега, изменяющаяся во времени:  $\rho_{c_j} = \rho_{c_0} + \rho_{c_{j-1}}\rho_c k_c$ ,  $\rho_{c_0}$  — начальная плотность снега,  $k_c$  — параметр.

Фильтрация в подземный водный горизонт активного водообмена ( $I_p$ ) за  $j$ -е сутки определялась из следующих соотношений:

при отсутствии вечной мерзлоты

$$I_p^j = k_f (P^j + M^j - E^j) (W^j / W_{fc});$$

при наличии вечной мерзлоты

$$I_p^j = t_f k_f (P^j + M^j - E^j) (W^j / W_{fc}),$$

где  $M$  — суточное снеготаяние, мм;  $W_{fc}$  — наименьшая влагоемкость почвогрунтов, мм;  $k_f$  — коэффициент вертикальной фильтрации в подземные воды, параметр модели;  $t_f$  — параметр, зависящий от типа вечной мерзлоты в данном узле расчетной сетки.

Подземный сток рассчитывался следующим образом:

$$Q_{gr}^j = k_{gr}(H_{gr}^j / H_{max}),$$

где  $H_{max}$  — максимальная емкость подземного водоносного горизонта;  $H_{gr}$  — емкость подземного горизонта в  $j$ -е сутки;  $k_{gr}$  — коэффициент подземного стока (параметр модели);

$$H_{gr}^j = H_{gr}^{j-1} + I_p^j - Q_{gr}^{j-1} - I_d^j.$$

Фильтрация влаги в глубокие горизонты подземных вод вне зоны активного водообмена  $I_d$  принималась равной постоянной величине.

Изменение мощности подземного водоносного горизонта активного водообмена для  $j$ -х суток рассчитывалось из соотношения

$$\Delta H_{gr}^j = H_{gr}^j - H_{gr}^{j-1}.$$

Фильтрация воды в подземный водный горизонт активного водообмена  $I_p$  и  $Q_{gr}$  для разных типов многолетнемерзлых почвогрунтов (сплошная, прерывистая или островная вечная мерзлота и в их отсутствие) рассчитывалась с эмпирическими весовыми коэффициентами.

## 2. Общая схема расчетов

В качестве исходной информации для модельных расчетов использовались среднемесячные среднемноголетние данные о температурах воздуха и суммах атмосферных осадков, а также данные о влагозапасах и физических характеристиках почвогрунтов (наименьшей влагоемкости почвогрунтов, их объемном и удельном весах), о характере распространения вечной мерзлоты (сплошная, прерывистая, островная, отсутствие многолетнемерзлых

грунтов), максимальной мощности сезонно-талого слоя почвогрунтов, данные о стоке в узлах регулярной сетки.

Расчеты проводились с суточным шагом по времени. Поскольку для расчетов использовались многолетние среднемесячные данные наблюдений, проводилась интерполяция данных наблюдений по суткам. При задании внутримесячной изменчивости температуры воздуха предполагалось, что среднемесячная температура воздуха приходится на 15-е число каждого месяца, а температура на 1-е число всех месяцев с января по июль принималась на  $T_{сд}^{\circ}$  меньше, тогда как температура на последний день этих месяцев задавалась на  $T_{сд}^{\circ}$  больше среднемесячной. С августа по декабрь делалась обратная процедура. Внутри месячного интервала проводилась линейная интерполяция между заданными температурами воздуха на 1-, 15-е и последнее число каждого месяца. Величина отклонения температуры воздуха на начало и конец месяца от среднемесячной ( $\pm T_{сд}^{\circ}$ ) подбиралась эмпирически.

Расчеты проводились с 1 января по 31 декабря. Однако для расчетов кроме исходной информации о метеоданных и почвенных характеристиках необходимо иметь данные о запасах влаги в почве, запасах воды в снеге, мощности подземного водоносного горизонта на дату начала расчетов (1 января). Для приближенного задания начальных условий проводился расчет этих величин за предыдущие четыре месяца (с сентября по декабрь), в дальнейшем данные расчета использовались в качестве начальных условий на 1 января.

### 3. Методы калибровки параметров

Модель включает 15 параметров. Семь из них ( $T_{кр}^{\circ}$ ,  $t_m$ ,  $k_t$ ,  $t_f$ ,  $H_{gr\ max}$ ,  $T_{сд}^{\circ}$ ,  $\rho_{сj}$ ) подбирались эмпирически. Для идентификации остальных параметров модели использовалась процедура оптимизации Х. Розенброка [7], которая представляет собой метод покоординатного спуска с попеременной заменой осей.

Оптимизация модели проводилась на основе гридированных среднесезонных данных о среднемесячной температуре воздуха, атмосферных осадках, испарении и испаряемости из архива Международного института прикладного системного анализа (Австрия) [8] и среднемесячного речного стока бассейна реки Лены, полученного на основе интерполяции данных о стоке репрезентативных речных бассейнов в пределах бассейна реки Лены. Для оптимизации параметров использованы данные по 50 % узлов регулярной сетки, которые равномерно распределены по территории речного бассейна. Оставшиеся 50 % данных служили основой для верификации модели.

Оптимизация проводилась в несколько этапов отдельно для разных блоков модели. На первом этапе, используя блоки расчета испаряемости и испарения по многолетним данным о среднемесячных фактических величинах испарения, оптимизировались параметры  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  и  $\beta$ . В качестве критерия качества принималась сумма среднеквадратичных отклонений расчетных значений месячного испарения от фактических. На втором этапе оптимизировались параметры для расчетов сезонного оттаивания (промерзания) почвы  $A_k$  и  $k_c$ . Критерий качества считался как сумма среднеквадратичных отклонений расчетных значений максимального сезонного оттаивания почвы от фактических. Далее в первом приближении оптимизировались коэффициент стаивания  $\kappa$ , коэффициент вертикальной фильтрации в грунтовые воды  $k_f$  и коэффициент грунтового стока  $k_{gr}$  по данным о стоке. И на четвертом этапе вновь уточнялись параметры  $A_k$  и  $k_c$  по данным о сезонном оттаивании почвы. На последнем этапе по данным о стоке уточнялись эти коэффициенты. Кроме

того, на всех этапах проводился эмпирический подбор и уточнялись остальные параметры модели. Подбирались наиболее устойчивые параметры, величину которых можно задать приблизительно без ущерба для точности расчетов.

Такая многоступенчатая процедура идентификации параметров, как показала практика использования гидрологических моделей, несмотря на свою громоздкость, вполне себя оправдывает. Хотя наиболее достоверной гидрологической информацией обычно являются данные о стоке, для первого приближения бывает удобно использовать и другую гидрометеорологическую информацию, что обычно повышает надежность определения параметров.

## 4. Верификация модели

Модель верифицировалась по критерию близости рассчитанных и наблюдаемых данных о годовом стоке и стоке за период половодья. Мерой для верификации модели служило соотношение  $S_o/\sigma$ , используемое в России в практике гидрологических прогнозов и расчетов. Здесь  $S_o = [\Sigma (R_{\text{obs}} - R_{\text{calc}})^2] / n$ ,  $\sigma = [\Sigma (R_{\text{obs}} - R_{\text{meaj}})^2] / (n - 1)$ , где  $R_{\text{obs}}$  — наблюдаемое значение стока;  $R_{\text{calc}}$  — рассчитанное значение стока;  $R_{\text{meaj}}$  — среднее значение стока, число членов в выборке.

Верификация модели проводилась на основе сравнения данных инструментального периода и результатов математического моделирования. Для этого использована независимая выборка гридированных среднемноголетних наблюдаемых и рассчитанных по модели месячного водного баланса данных о годовом стоке и стоке периода половодья. Выборка сформирована из оставшихся (независимых) данных по 50 % узлов регулярной сетки, равномерно распределенных по территории речного бассейна.

Как в случае с годовым стоком ( $S_o/\sigma = 0.68$ ), так и со стоком весеннего половодья ( $S_o/\sigma = 0.56$ ) значения этого критерия оказались меньше 0.75, что говорит об удовлетворительной надежности результатов, полученных при использовании модели месячного водного баланса.

## 5. Описание использованных данных

*Данные о современном климате.* Используются среднемноголетние данные о среднемесячных значениях температуры воздуха и атмосферных осадках в узлах регулярной сетки  $1 \times 1^\circ$  из дополненного глобального архива, подготовленного в Международном институте прикладного системного анализа [8]. Эти данные, так же как данные по стоку и отклонениям климатических элементов, сглажены.

*Данные о речном стоке.* Для подготовки данных о среднемноголетних месячных значениях речного стока в узлах регулярной сетки  $1 \times 1^\circ$  использована информация о среднемноголетнем месячном стоке средних рек бассейна реки Лены. Данные о стоке относились к средневзвешенному центру бассейнов, а затем интерполировались в узлы регулярной сетки. В расчетах использовались данные о стоке, осредненные за периоды времени, превышающие 30 лет и относящиеся в большинстве своем к временному отрезку между 30-ми — 40-ми и 80-ми годами 20 в.

*Данные об отклонениях климатических элементов от их современных значений.* В качестве сценарных оценок измененных в будущем климатических условий использованы результаты численных экспериментов на двух моделях общей циркуляции атмосферы и

океана, участвующих в программе IPCC: модели Метеорологического института им. Макса Планка, Германия (MPI-M ECHAM4/OPY3), и модели Геофизической лаборатории гидродинамики Принстонского университета, США (GFDL-R30).

Использованы результаты модельных экспериментов, исходящих из семейства  $A_2$  сценариев глобальных социально-экономических изменений в 21 в. из последней, улучшенной серии таких сценариев SRES, принятой в программе IPCC. Использованы два периода (2010–2039, 2040–2069 гг.) для расчета отклонений среднемноголетних среднемесячных сумм атмосферных осадков и температуры воздуха от современных значений (рассчитанных для периода 1961–1990 гг.).

## 6. Обсуждение результатов моделирования

*Климатические условия.* Согласно рассматриваемым сценариям в равнинной, центральной части бассейна реки Лены ожидается существенное потепление климата, более интенсивное в середине 21 в. На рисунках приведены отклонения среднемесячных значений температуры воздуха ( $\Delta T$ , °C), атмосферных осадков ( $\Delta P$ , мм) и речного стока ( $\Delta Q$ , мм) для условий потепления климата от современных их значений, обобщенных по узлам сетки, покрывающей равнинную часть бассейна р. Лена в 2010–2039 гг. и 2040–2069 гг. На рис. 1 и 2, *а* — по сценарию Геофизической лаборатории гидродинамики Принстонского университета, США; *б* — по сценарию Метеорологического института им. Макса План-

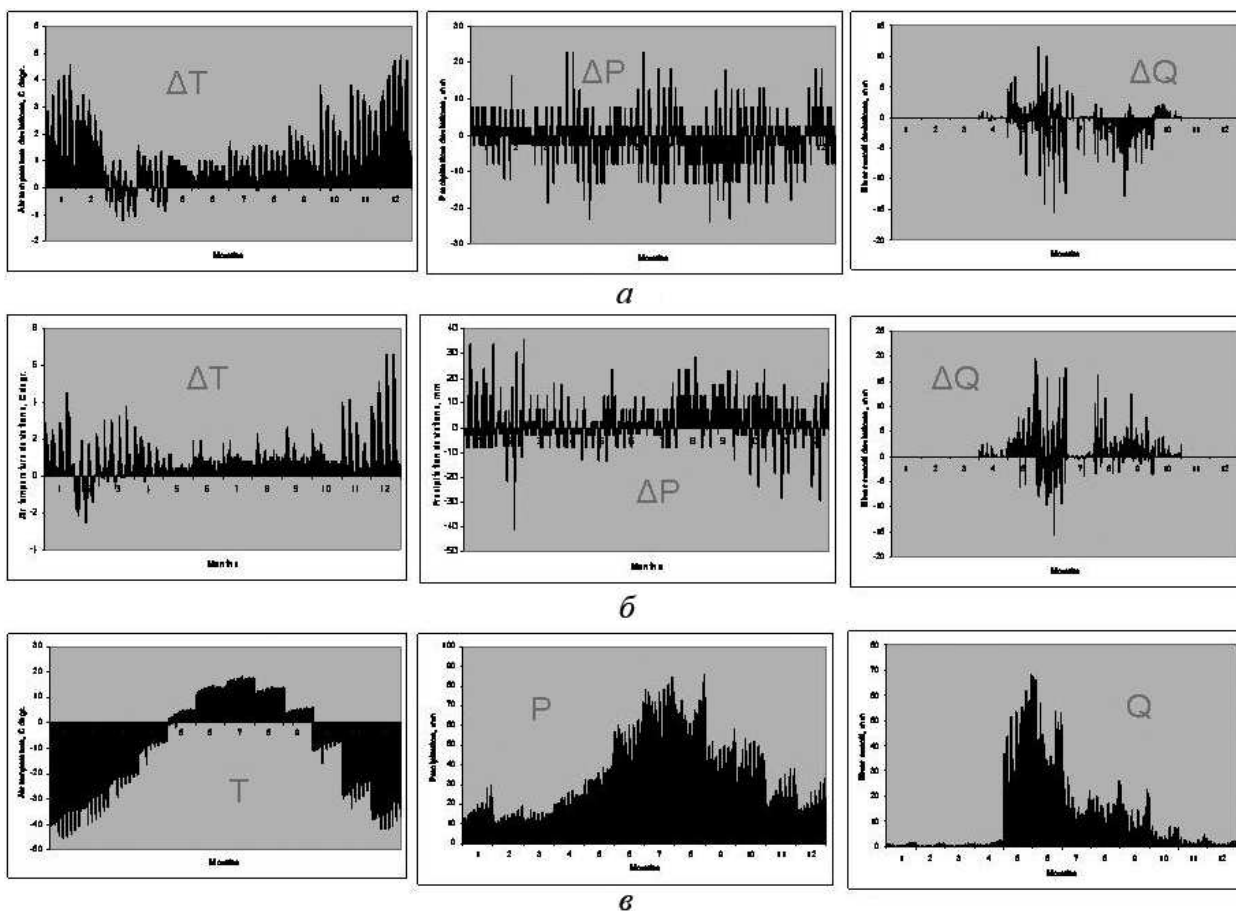


Рис. 1. Отклонения среднемесячных значений в 2010–2039 гг.

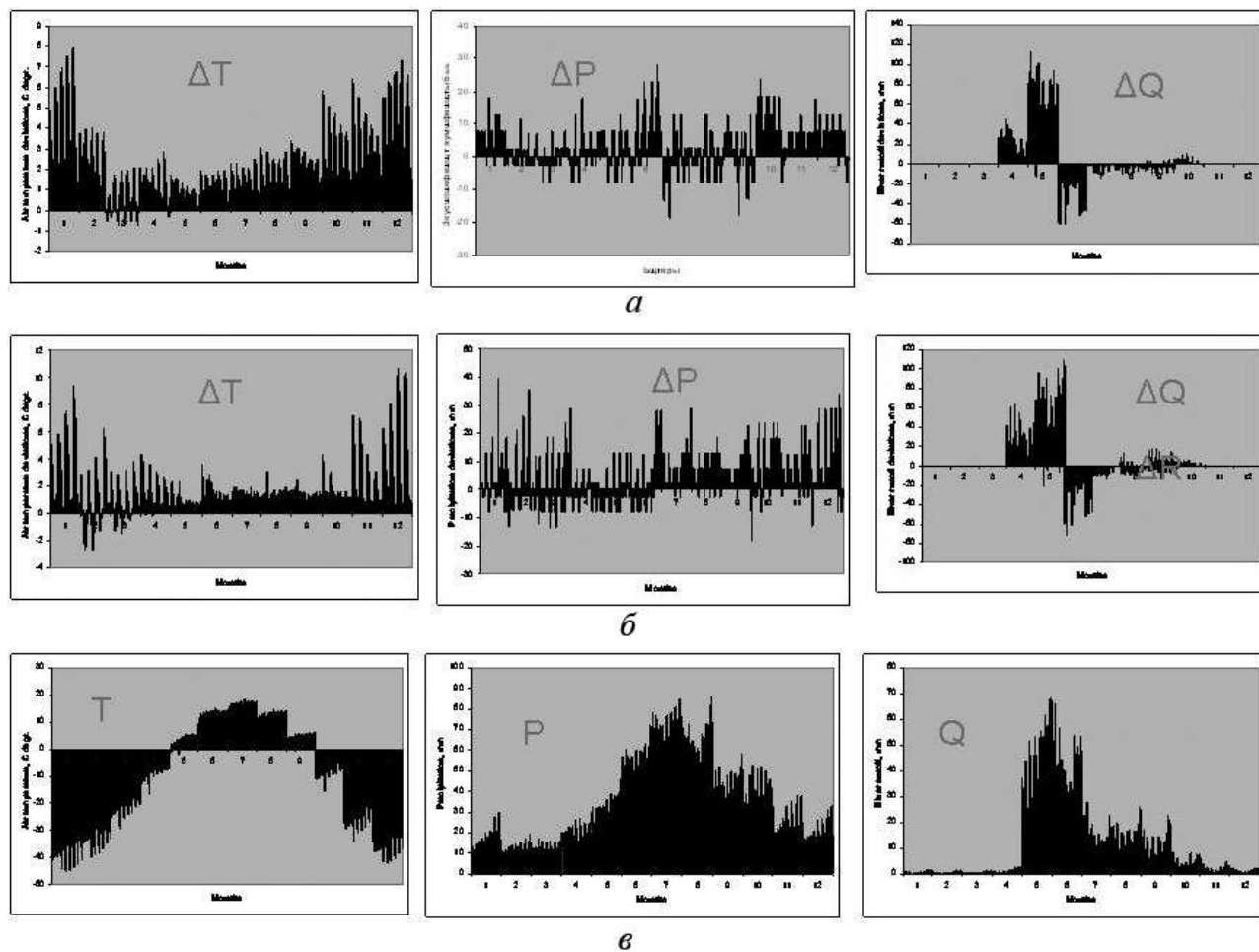


Рис. 2. Отклонения среднемесячных значений в 2040–2069 гг.

ка, Германия; *в* — среднемесячные значения температуры воздуха ( $T$ , °C), атмосферных осадков ( $P$ , мм), речного стока ( $Q$ , мм) для условий потепления современного климата.

Согласно сценарию Метеорологического института им. Макса Планка, потепление может быть более ощутимым. Оба сценария прогнозируют более заметный рост температуры воздуха в холодную часть года, что приведет к сокращению ее продолжительности. Характер изменений атмосферных осадков более сложен. Лишь к середине этого столетия согласно обоим сценариям будет заметна тенденция повышения атмосферного увлажнения.

Следует заметить, что характер внутригодового распределения сценарных изменений среднемесячной температуры воздуха и атмосферных осадков весьма схож с соответствующими изменениями, наблюдаемыми в этом регионе в последние десятилетия в период современного потепления климата, но отличается от современных масштабом изменений.

*Гидрологические условия.* Согласно климатическим сценариям Геофизической лаборатории гидродинамики Принстонского университета и Метеорологического института им. Макса Планка, в равнинной части бассейна реки Лены в течение первой половины текущего столетия не следует ожидать сколько-нибудь ощутимого повышения как годового стока, так и стока за период половодья (три месяца с наибольшим месячным стоком). Лишь при реализации сценария Геофизической лаборатории гидродинамики Принстон-

ского университета средний по территории сток половодья может возрасти более чем на 10 мм. Следует заметить, что распределение возможных изменений речного стока по территории этой части бассейна характеризуется существенной неоднородностью, которая заметно снижается к середине столетия.

Согласно обоим сценариям могут произойти значительные изменения внутригодового распределения стока. Основные различия в его изменениях между двумя сценариями в первой трети текущего века приурочены к части теплого периода после прохождения основной волны половодья, тогда как прогнозируемые по обоим моделям сценарные изменения структуры половодья очень близки между собой (см. рис. 1). К середине века оба сценария дают по существу одинаковую картину изменений внутригодового распределения стока — волна половодья компактно (практически без изменения формы и объема воды за половодье) сдвигается на один месяц раньше по сравнению с современной ситуацией. Заметим, кстати, что характер изменений внутригодового распределения стока в бассейне реки Лены сходен с аналогичными изменениями при вероятном глобальном потеплении климата в текущем столетии в бассейне реки Волги.

## Заключение

1. Согласно рассмотренным сценариям в равнинной (центральной) части бассейна реки Лены ожидается существенное потепление климата, более интенсивное в середине 21 в.

2. Характер внутригодового распределения сценарных изменений среднемесячной температуры воздуха и атмосферных осадков весьма схож с соответствующими изменениями, наблюдаемыми в этом регионе в последние десятилетия в период современного потепления климата, но отличается от современных масштабом изменений.

3. В течение первой половины текущего столетия не следует ожидать сколько-нибудь ощутимого повышения как годового стока, так и стока за период половодья.

4. Могут произойти значительные изменения внутригодового распределения стока. К середине века оба сценария дают по существу одинаковую картину изменений внутригодового распределения стока — волна половодья компактно (практически без изменения формы и объема воды за половодье) сдвигается на один месяц раньше по сравнению с современной ситуацией.

Авторы признательны Р. Лимансу за предоставление глобальной базы данных о современном климате, подготовленной в Международном институте прикладного системного анализа, г. Лаксенбург, Австрия.

## Список литературы

- [1] ГЕОРГИАДИ А.Г., МИЛЮКОВА И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
- [2] ГЕОРГИАДИ А.Г., МИЛЮКОВА И.П. Возможные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек Русской равнины в XXI веке // Водное хозяйство России. 2006. № 1. С. 62–77.
- [3] WILLMOTT C.J., ROWE C.M., MINTZ Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle // J. of Climatology. 1985. Vol. 5. P. 589–606.



- [4] РУКОВОДСТВО по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек, озер и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.
- [5] ПАВЛОВ А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1979. 278 с.
- [6] БЕЛЬЧИКОВ В.А., КОРЕНЬ В.И. Опыт использования модели формирования талого и дождевого стока рек лесной зоны европейской территории СССР // Тр. ГМЦ. Вып. 246. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 3–20.
- [7] РОЗЕНБРОК Х., СТОРИ С. Вычислительные методы для инженеров-химиков: Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 440 с.
- [8] CRAMER W.P., LEEMANS R. Global 30-Year Mean Monthly Climatology, 1930–1960. Vol. 2.1 (Cramer and Leemans). Available online (<http://www.daac.ornl.gov/>) from the ORNL Distributed Active Archive Center. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge. Tennessee. U.S.A, 1999.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*