

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.512

В.Ю. Григорьев^{1,2}, Т.Д. Миллионщикова³, А.А. Сазонов^{4,5}, С.Р. Чалов⁶

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТОК РЕК БАССЕЙНА БАЙКАЛА ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI вв.

Приведены результаты анализа изменения стока крупнейших притоков озера Байкал – рек Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин, Турка, Хара-Мурин, Снежная, Утулик и Большая речка за 1950–2016 гг. На основе данных CRU TS рассмотрена роль изменения нормы осадков (P) и потенциального испарения (PET) в изменении годового стока рек (R) за 1976–1995 гг. и 1996–2016 гг. относительно 1950–1975 гг. Для оценки точности воспроизведения R различными модификациями формулы Будыко по данным о P и PET использовалась модель ECOMAG. Получено, что в бассейне р. Селенги при аномалии P от -10% до $+10\%$ разница между рассчитанной по одной из формул и смоделированной величиной R составляет от 0,2 мм до 0,53 мм. Показано, что за 1950–2016 гг. для бассейна Байкала в целом характерно уменьшение P и R и рост PET . Отклонение рассчитанных по формулам величин R от наблюдаемых за 1976–1995 гг. и 1996–2016 гг. трактовалось как влияние прочих факторов, которые включают в себя как изменение свойств подстилающей поверхности и особенностей внутригодового распределения осадков и потенциального испарения. Вклад прочих факторов в изменение R меняется в зависимости от водосбора и рассматриваемого периода. Для рек бассейна Байкала изменение годовых величин P и PET в среднем лишь на 50% объясняет изменение нормы стока за 1976–1995 гг. и 1996–2016 гг. по сравнению с 1950–1975 гг. Чувствительность речного стока бассейна Байкала к прочим, помимо P и PET факторам, необходимо учитывать при сценарных оценках изменения стока рек Байкала в условиях изменения климата. Также выявлено, что условия формирования стока за 1976–1995 гг. (помимо р. Хара-Мурин) и 1996–2016 гг. (кроме рек Хара-Мурин и Селенга) были более благоприятными для формирования стока, чем за 1950–1975 гг.

Ключевые слова: многолетний водный баланс, формула М.И. Будыко, Байкал, изменение климата, ECOMAG

Введение. Изменение уровня оз. Байкал находится под влиянием как особенностей регулирования стока на Иркутской ГЭС на р. Ангаре, так и особенностей формирования стока на водосборе. Важность последних определяется практически полным совпадением величин осадков и испарения за многолетний период на поверхности самого озера, которые составляют порядка 13–14% от приходной и расходной частей водного баланса Байкала [Афанасьев, 1967]. Особый интерес изучения колебаний годового притока в оз. Байкал связан с периодом низкого стока, начавшимся в 1996 г., а также с прогнозируемым уменьшением стока основного притока Байкала (р. Селенги) под воздействием изменения климата [Миллионщикова, 2019] и строительства водохранилищ на ее притоках [Чалов и др., 2016].

На реках бассейна Байкала преобладает дождевое питание, доля которого колеблется от 60–80% в южных и юго-восточных районах до 30–40% в северных и центральных. Величина осадков явля-

ется основным фактором, определяющим изменчивость годового стока крупнейших рек бассейна Байкала. Коэффициенты корреляции между слоем осадков и слоем речного стока составляют: для р. Селенги – 0,75, р. Баргузина – 0,84 и р. Верхней Ангары – 0,46 [Сизова, Шимараев, 2012; Фролова и др., 2017]. Характер крупномасштабной атмосферной циркуляции определяет условия формирования речного стока в бассейне Байкала [Сизова, Шимараев, 2012]. Наблюдается положительная корреляция индекса атлантического колебания с температурой и влажностью воздуха за все месяцы, кроме летних [Шимараев, Старыгина, 2010]. Корреляция с годовым стоком составляет 0,29.

Одной из особенностей многолетней изменчивости стока рек бассейна Байкала и, прежде всего, его крупнейшего притока – р. Селенги, является тенденция к формированию периодов повышенной и пониженной водности [Гармаев, Христофоров, 2010; Синюкович и др., 2013; Марченко, 2013; Фро-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, инженер, канд. геогр. н.; e-mail: vadim308g@mail.ru

² Институт водных проблем РАН, мл. науч. с.

³ Институт водных проблем РАН, мл. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: tatyana.million@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, старший преподаватель; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

⁵ Институт водных проблем РАН, инженер

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: hydroserg@mail.ru

лова и др., 2017]. Реконструкция режима осадков и речного стока бассейна р. Селенги для периода с середины XVII в. [Davi et al., 2006; Pederson et al., 2012; Баженова, Кобылкин, 2013] показывает, что по сравнению с двумя предшествующими столетиями XX в. отличался повышенными величинами речного стока, а затяжные маловодья, подобные тем, что случались в XX в., уже имели место ранее.

Период, начиная с 1930-х гг., уже освещен данными гидрометеорологических наблюдений. Для него отмечается незначительное влияние хозяйственной деятельности на величину притока в озеро Байкал [Гармаев, Христофоров, 2010]. Косвенное влияние на величину притока могло оказать сведение лесов в бассейне р. Селенги, за 1999–2012 гг., составившее 17% от общей площади лесов [Сутырина, 2015]. Однако в силу неопределенности в направлении трансформации биоценозов на местах вырубок гидрологическая роль сведения лесов в бассейне Селенги неясна. Для стока р. Селенги, начиная с 1970-х гг., многие авторы фиксируют заметное уменьшение годовых расходов и их дисперсии, главным образом за счет сокращения летнего стока, а также сокращение расходов весеннего половодья [Фролова и др., 2017; Синюкович, Чернышев, 2017; Törnqvist et al., 2014]. На Верхней Ангаре, напротив, отмечен рост расходов весеннего половодья при некотором сокращении расходов дождевых паводков, что выразилось в увеличении годового стока. Для Баргузина характерна относительная устойчивость величины годового стока [Синюкович, Чернышев, 2017]. Для годового стока крупнейших рек бассейна Байкала свойственна автокоррелированность, наиболее ярко прослеживающаяся на р. Селенге ($r_1 > 0,31$) [Фролова и др., 2017; Синюкович, Чернышев, 2017]. Вывод о наличии внутри-рядной связанности в рядах суммарного притока в озеро зависит от используемых критериев и, в зависимости от работы, находит подтверждение [Синюкович и др., 2013] или нет [Добровольский, 2017]. В целом для рек данного региона характерно уменьшение коэффициента вариации и коэффициента автокорреляции годового стока при увеличении нормы модуля стока [Добровольский, 2017].

Большинство работ, посвященных изменению притока в оз. Байкал, связывают его динамику с колебаниями годовых величин осадков и потенциального испарения [Фролова и др., 2017; Törnqvist et al., 2014]. Влияние изменения внутригодового распределения осадков, состояния многолетней мерзлоты и растительного покрова на величину годового речного стока изучено слабее. Отмечен рост коэффициента стока при росте интенсивности осадков [Mu et al., 2015]. Для отдельных территорий северо-востока Сибири и Аляски показано, что рост сезонно-талого слоя (СТС), температуры почвы и, как следствие, увеличение количества доступной для испарения воды ведет к росту величины устьичной проводимости и транспирации для бореальных лесов [Kropp et al., 2017; Cable et al., 2013], что за счет

роста величины испарения может привести к снижению величины речного стока. Рост концентрации CO_2 , сопровождающийся ростом глобальной температуры, напротив, приводит к росту устьичного сопротивления [Ukkola, Prentice, 2013].

В зависимости от оценок изменения стока рек бассейна Байкала будут различаться и оценки последствий хозяйственной деятельности на водосборе, включая изменение режима работы Иркутской ГЭС и строительства новых ГЭС в бассейне Селенги. При этом оценка чувствительности стока рек бассейна Байкала к изменению различных факторов с помощью моделей формирования стока затруднена из-за недостатка как гидрометеорологической информации, так и информации о ландшафтных особенностях территории (особенно для монгольской части бассейна и периода до начала регулярных спутниковых наблюдений). Это делает актуальным поиск таких методов разделения вклада различных составляющих в изменение нормы стока рек бассейна Байкала, которые не требовали бы детальных сведений о погодных и ландшафтных условиях бассейна.

Целью данной работы является анализ изменения слоя годового стока (R) крупнейших притоков Байкала (Селенги, Верхней Ангары, Баргузина, Турки, Хара-Мурина, Снежной, Утулика и Большой речки) под влиянием изменения годового слоя осадков (P) и потенциального испарения (PET), а также учет вклада прочих факторов (хозяйственная деятельность, почва, растительность и др.) за 1950–2016 гг. Задачами работы являются обоснование алгоритма расчета изменения речного стока и выявление роли различных факторов в нем, оценка изменения R , P и PET для бассейнов крупнейших притоков, оценка вклада изменения нормы слоя осадков и потенциального испарения в изменение нормы речного стока.

Методы и исходные материалы. В статье использовались среднегодовые расходы воды по замыкающим створам рек Селенга (рзд. Мостовой), Верхняя Ангара (с. Верхняя Займка), Баргузин (пос. Баргузин), Турка (с. Соболика), Хара-Мурин (пос. Мурино), Снежная (ст. Выдрино), Утулик (пос. Утулик) и Большая Речка (ст. Посольская) за 1950–2016 гг. (рис.).

В работе был проанализирован сток не всех рек бассейна Байкала, а лишь наиболее водоносных и с наибольшими по площади бассейнами. Исключение составляют реки Тья и Голоустная со среднегодовыми расходами в 40,2 м³/с и 12,6 м³/с, которые были исключены из-за слишком большого количества пропусков в рядах данных (более 15 лет для каждой реки). Из работы также был исключен ряд малых рек (Половинная, Большая Сухая, Мысовка и др.) в связи с малой площадью их водосбора и большим перепадом высот в его пределах, что затрудняет корректную оценку величин осадков и потенциального испарения для них.

Согласно [Синюкович и др., 2013], приток в Байкал за 1959–2010 гг. составил 63,5 км³/год. Суммар-

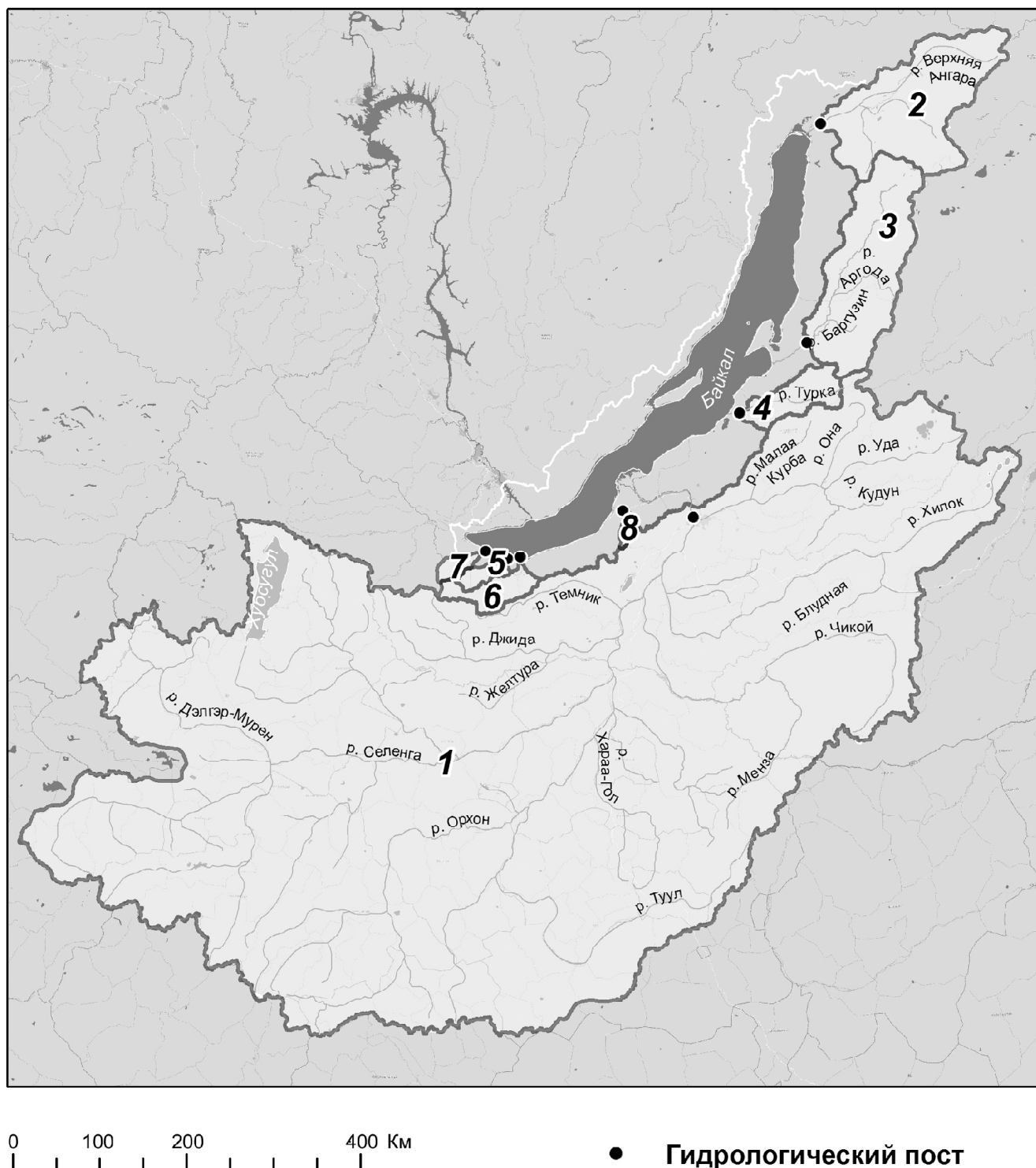


Рис. Положение рассматриваемых в работе речных бассейнов: 1 – р. Селенга – рзд Мостовой, 2 – р. Верхняя Ангара – с. Верхняя Заимка, 3 – р. Баргузин – пос. Баргузин, 4 – р. Турка – с. Соболиха, 5 – р. Хара-Мурин – пос. Мурино, 6 – р. Снежная – ст. Выдрино, 7 – р. Утулик – пос. Утулик, 8 – р. Большая Речка – ст.Посольская

Fig. Location of river basins considered in the study: 1 – elenga River Mostovoi halt, 2 – pper Angara River Verchnia Zaimka settl., 3– arguzin River – Barguzin settl., 4 – Turka River – Sobolikha village, 5 – Hara-Murin River – Murino settl., 6 – Snezhnaya River – Vydrino st., 7 – Utulik River – Utulik settl., 8 – Bolshaya Rechka River – Posolskaya st.

ный сток восьми рассмотренных в работе рек за этот же период был оценен в 45,7 км³/год, т. е. порядка 72% от общего. Отметим, однако, что для бассейна Байкала характерно уменьшение изменчи-

вости годовых расходов воды при росте слоя стока [Добровольский, 2017]. Подобная тенденция заметна и для усредненных за многолетний период величин расходов, т. е. вклад рассматриваемых рек имен-

но в изменчивость притока воды в Байкал будет выше 72% (главным образом, за счет Селенги).

Для анализа годовых величин осадков и потенциального испарения использовался архив CRU TS 4.01 [Harris et al., 2013], полученный по данным наблюдений на метеостанциях. Величина PET в CRU TS рассчитывается по величинам средней, минимальной и максимальной суточной температуры, влажности воздуха и облачности [Mohammad et al., 2014].

Рассматривались три периода, отличных по особенностям формирования стока: 1950–1975 гг. (базовый период), 1976–1995 гг. и 1996–2016 гг. Выбор 1950 г. в качестве начального обусловлен недостаточной густотой сети метеостанций и используемым на них типом осадкомерного прибора (дождемера Нифера) в предшествующие периоды. Верхняя граница первого периода связана с началом резкого роста приземной температуры воздуха с 1976 г. как в рассматриваемом регионе, так и на глобальном уровне. Выбор 1996 г. в качестве граничного связан с началом периода низкого стока на крупнейшем притоке Байкала – р. Селенге [Фролова и др., 2017] и ростом PET на глобальном уровне с 1990-х гг.

Для оценки вклада изменения годовых величин осадков и потенциального испарения в изменение речного стока анализировались эмпирические зависимости – формула Будыко (1) [Бабкин, 2016] и некоторые ее модификации, предложенные Fu (2) и Zhang (3) [Dey, Mishra, 2017]. Также использовалось уравнение линейной регрессии между R и P (4):

$$E = \sqrt{P \left(1 - \exp \left(-\frac{PET}{P} \right) \right)} PET th \frac{P}{PET}, \quad (1)$$

$$E/P = 1 + PET/P - \left[1 + (PET/P)^w \right]^{1/w}, \quad (2)$$

$$E/P = \frac{1 + w(PET/P)}{1 + w(PET/P) + (PET/P)^{-1}}, \quad (3)$$

$$R = bP + c, \quad (4)$$

где w – параметр, различный для (2) и (3), b и c – коэффициенты в уравнении линейной регрессии (4).

Эмпирические коэффициенты в формулах (1–4) отражают влияние прочих факторов формирования стока, таких как состояние растительного покрова, совпадения периодов максимальной увлажненности почвы и максимальных величин потенциального испарения, интенсивности и продолжительности осадков и др. Эти факторы формирования изменяются по территории, но могут также меняться со временем для отдельных водосборов, влияя на величину R .

Для оценки влияния прочих факторов, помимо P и PET , на величину R для второго (1976–1995 гг.) и

третьего (1996–2016 гг.) периодов, по формулам (1–4) рассчитывалась величина стока за эти периоды ($R_{расч}$ и $R_{расч}$) с параметрами и коэффициентами, полученными по данным за первый период. Соответственно, в случае если измеренная величина стока за второй период (R_2) оказывалась больше $R_{расч}$, то прочие факторы для формирования стока (помимо годовых величин P и PET) за второй период были более благоприятными по сравнению с первым.

Выбор формулы для расчета $R_{расч}$ выполнялся на основе сравнения с результатами моделирования региональной гидрологической модели, которая разработана для оценки влияния изменений климата на водный режим бассейна р. Селенги [Gelfan, Millionshchikova, 2018] на основе Информационно-моделирующего комплекса ECOMAG [Motovilov et al., 1999].

Использование формул (1–3) требует, чтобы величина изменения бассейновых влагозапасов (TWS), включающих в себя все влагу на территории речного бассейна и толще почвогрунтов под ним во всех агрегатных состояниях, за многолетний период была пренебрежимо малой по сравнению с величиной речного стока. Для оценки величины изменчивости бассейновых влагозапасов использовались данные проекта GRACE, поставляемые JPL [Зотов и др., 2015] в версии RL-06.

Результаты и обсуждение. Выбор формулы для расчета величины изменения речного стока на основе сравнения с данными наблюдений невозможен, т. к. изменение реальных величин стока происходит не только в результате изменения годовых величин осадков и потенциального испарения. Для выбора формулы, наиболее точно описывающей эту зависимость, мы воспользовались результатами оценки чувствительности изменения годового стока р. Селенги. В [Миллионщикова, 2019] приводится расчет годового стока р. Селенги за 1986–2013 гг. при изменении годовой величины осадков (ΔP) от –10% до +10%. Результаты расчета по формулам (1–4) сравнивались с этими величинами, при этом параметры зависимостей определялись по данным за 1986–2013 гг. Абсолютная ошибка рассчитывалась как

$$Err = R_{an}^{calc} - R_{an}^{mod}, \quad (5)$$

а относительная –

$$Err, \% = 100 \frac{R_{an}^{calc} - R_{an}^{mod}}{R_{an}^{mod} - R_0^{mod}}, \quad (6)$$

где индекс *calc* означает результат расчета по формулам (1–4), *mod* – рассчитанный по модели ECOMAG, *an* – величина аномалии осадков в процентах. Результаты сравнения формул представлены в табл. 1.

Все эмпирические формулы занижают величины изменения речного стока как при отрицательных, так и при положительных аномалиях осадков, причем в последнем случае ошибка больше для всех формул, кроме формулы Будыко. Наихудшие резуль-

Таблица 1

Оценка точности расчета изменения нормы речного стока по формулам 1–4

$\Delta P, \%$	$Err, \text{мм} (5)$				$Err, \% (6)$			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
–10	1,91	0,88	0,32	2,3	–14	–6,47	–2,35	–16,8
–5	0,97	0,49	0,2	1,39	–13,8	–6,88	–2,78	–19,6
5	–0,96	–0,52	–0,22	–1,81	–12,8	–6,94	–2,92	–24,1
10	–1,98	–1,14	–0,53	–4,09	–12,8	–7,38	–3,43	–26,5

таты показало уравнение линейной регрессии (4), а наилучшие – формула (3), которая использовалась в дальнейшем. Она также показала наилучшие результаты при рассмотрении зависимости нормы стока от потенциального испарения.

Изменение водного баланса. Оценка составляющих водного баланса R , P и PET за первый, второй и третий периоды (табл. 2) показала противоположно направленные тенденции их изменения. Для всех рассматриваемых речных бассейнов, помимо бассейна р. Баргузин, второй период отличается меньшей величиной слоя осадков по сравнению с первым (в среднем на 1,3%). При этом наибольшее снижение (на 5%) характерно для малых рек юга Байкала. Количество осадков за третий период по сравнению с первым снизилось уже на 5,4%. Однако, в отличие от второго периода, наибольшие отрицательные аномалии характерны для бассейна р. Селенги (–6,6%). Для бассейна Ангара осадки выросли (+2,5%), а снижение в остальной части бассейна Байкала составило от 0 до 3%. Линейный тренд P за первый период практически отсутствует. Наиболее заметное изменение происходило в бассейне Селенги – рост на 0,2%/год. В рамках второго периода P рос более чем на 1% в год. Однако этот рост связан с минимальными за весь второй период величинами осадков за 1977–1981 гг. После 1995 г. величина осадков практически не менялась, незначительно уменьшившись в бассейнах В. Ангара (–0,47%/год) и Баргузина (–0,72%/год).

Величина потенциального испарения была больше за второй и третий периоды по сравнению с первым для всех восьми водосборов, причем лишь для бассейна В. Ангара PET_2 выше, чем PET_3 . В среднем для рассматриваемой территории PET_2 больше PET_1 на 1,9%, а PET_3 больше PET_1 на 4,6%. В течение первого периода наблюдался устойчивый рост величины PET от 0,07%/год в бассейне Снежной до 0,3%/год в бассейне В. Ангара. Во второй период величина PET снижалась для всех водосборов кроме В. Ангара, с максимумом в бассейне Селенги (–0,22%/год). В третий период рост PET возобновился, причем интенсивней всего для северных притоков Байкала (В. Ангара, Баргузин, Турка, Большая речка), где он составил 0,2–0,3%/год.

Величина речного стока за второй период практически не отличается от первого – разница составляет менее 1,7%. Сток за третий период уже значительно меньше стока за первый – на 15,7% ($R_1=95,2$ и $R_3=79,4$ мм). При этом отрицательная тенденция характерна только для бассейнов Селенги (–26,7%), Хара-Мурина (–12,6%), Снежной (–6,3%) и Большой речки (–8,9%). В целом направленность изменений величины речного стока за каждый из периодов схожа с таковой для осадков. Отметим, что с 2010 г. пониженные величины стока характерны не только для р. Селенги, но и для других притоков Байкала (2010–2016 гг. для них были самыми маловодными за весь рассматриваемый период), что привело к росту доли стока р. Селенги в суммарном стоке

Таблица 2

Величины слоя речного стока (R), осадков (P) и потенциального испарения (PET) (мм) в бассейнах притоков оз. Байкал за 1950–1975 гг. (индекс 1), 1976–1995 гг. (индекс 2) и 1996–2016 гг. (индекс 3)

Река	F , тыс. км ²	R_1	R_2	R_3	P_1	P_2	P_3	PET_1	PET_2	PET_3
Селенга	440	68,3	67,5	50,1	373	348	348	647	659	677
В. Ангара	20,6	403	403	429	726	745	745	458	473	473
Баргузин	19,8	190	198	194	532	531	531	522	538	542
Турка	5,05	286	339	337	662	642	642	572	585	593
Хара-Мурин	1,15	685	646	599	928	904	904	547	554	562
Снежная	3	492	497	461	744	726	726	559	569	583
Утулик	0,96	534	534	556	900	879	879	546	554	562
Большая речка	0,57	709	650	646	739	721	721	569	581	595
Среднее	491	95,2	94,3	79,4	402	380	380	632	644	661

рассматриваемых рек с 53,6% в 1996–2009 гг. до 61% за 2010–2016 гг. В силу большей изменчивости стока р. Селенги в сравнении с другими притоками она в значительной степени определяет изменчивость притока воды в озеро. Так, по данным за 1950–2016 гг. изменчивость стока р. Селенги объясняет 92% дисперсии суммарного стока рассматриваемых рек (72% с учетом скоррелированности стока р. Селенги с остальными притоками).

Для водосбора р. Большая речка имеется систематическая ошибка в определении величины слоя осадков, т. к. при $P_1=739$ мм коэффициент стока составляет 0,96, что для физико-географических условий побережья Байкала неправдоподобно. Однако, учитывая высокий коэффициент корреляции между величинами осадков и речного стока (0,65), вероятно, что сам временной ход годовых сумм осадков в бассейне р. Большая речка архив CRU воспроизводит достаточно достоверно.

Анализ изменчивости величины TWS был произведен для периода 01.2003–01.2017 для трех крупнейших бассейнов (Селенга, В. Ангара, Баргузин). Величина среднеквадратического отклонения TWS в январе составила от 29 мм в бассейне Селенги до 48 мм в бассейне Баргузина. Допуская, что за 1950–2016 гг. в бассейнах рассматриваемых рек не было направленного изменения TWS , ошибка расчета слоя стока по формулам (1–3), связанная с неравенством нулю величины изменения TWS , за каждый из периодов может достигать 3 мм/год.

Оценка вклада изменения слоя годовых осадков и потенциального испарения в изменение слоя стока. Поскольку реальное изменение R за второй и третий периоды по сравнению с первым происходило под влиянием всех факторов, а $R_{расч}$ было получено лишь с учетом годовых величин P и PET (i – номер периода), то разница между ними – $R_i - R_{расч}$, представляет собой вклад прочих факторов в изменение R ($R_i - R_1$). При этом относительный вклад прочих факторов в изменение R , с учетом $R_1 = R_{расч}$, составит

$$R_{\%проч} = \frac{|R_i - R_{расч}| \cdot 100\%}{|R_i - R_{расч}| + |R_{расч} - R_1|}.$$

Сравнение $R_{расч}$ и R_2 показало, что для шести из семи водосборов измеренные величины стока превышают рассчитанные от 3,1 мм в бассейне р. Селенги до 68 мм в бассейне р. Турки (табл. 3). Таким образом, в целом для бассейна Байкала условия формирования стока были более благоприятными в 1976–1995 гг. по сравнению с 1950–1975 гг. Для бассейна р. Хара-Мурин разница между рассчитанными и измеренными величинами стока практически отсутствует. Отметим, что для соседних с ним водосборов (р. Снежная и р. Утулик), вклад $R_2 - R_{расч}$ в изменение стока составляет уже порядка 50%. Величина $R - R_{расч}$ также существенно различается для Хара-Мурина, Снежной и Утулика за третий период. С учетом близкого положения водосборов этих рек, вероятно, что различие обусловлено не метеорологическими факторами.

Наиболее значителен вклад прочих факторов в изменение речного стока для р. Турка ($R_{\%проч} - 76-81\%$). Так, при R_2 , превышающем R_1 на 18%, P_2 меньше P_1 на 2%, а PET_2 больше PET_1 на 2%. Для крупнейших рек бассейна Байкала – Баргузина, Верхней Ангара, Селенги – величина $R_3 - R_{расч}$ составила от –4,5 до 17 мм. При этом для бассейна р. Верхняя Ангара прочие факторы усилили положительную аномалию слоя стока за третий период, а для бассейна р. Селенги – напротив, усилили отрицательную аномалию.

Таким образом, изменение среднемноголетней величины речного притока в озеро Байкал за 1950–2016 гг. в среднем лишь на 45–50% (см. табл. 3) объясняется непосредственно изменениями годовых величин P и PET .

Выводы:

– при изменении слоя годовых осадков и сохранении их внутригодового распределения рассчитанные по модели ECOMAG и ряду эмпирических фор-

Таблица 3

Абсолютный ($R - R_{расч}$) и относительный ($R_{\%проч}$) вклад прочих, помимо изменения годовых величин P и PET , факторов в изменение R за второй (1976–1995 гг.) и третий (1996–2016 гг.) периоды по сравнению с первым (1950–1975 гг.)

Река	$R - R_{расч}$, мм		$R_{\%проч}$, %	
	1976–1995	1996–2016	1976–1995	1996–2016
Селенга	3,1	–4,5	44,2	24,5
В. Ангара	8	17	50,4	65,2
Баргузин	13	11	72,2	59,0
Турка	68	74	81,1	76,0
Хара-Мурин	–0,5	–65,6	1,2	75,9
Снежная	36	–13	54,0	42,6
Утулик	45	48	49,9	65,4

Примечание. Водосбор р. Большая речка в расчетах $R_{расч} - R$ и $R_{\%проч}$ не участвовал, в силу отсутствия достоверной информации по слою осадков на его территории.

мул величины изменения слоя годового стока дают близкие результаты. Так, в бассейне р. Селенги при аномалии слоя осадков от -10% до $+10\%$ разница между рассчитанной по формуле (3) и смоделированной величиной изменения слоя речного стока составляет от 2,35% до 3,43% – от 0,2 мм до 0,53 мм в абсолютном выражении;

– сравнение величин P , R и PET за три периода показало, что каждый последующий период отличается меньшей величиной осадков и речного стока и большей величиной потенциального испарения, при этом наиболее ярко эта тенденция прослеживается для бассейна р. Селенги, сток с которого определяет 72% дисперсии стока со всех рассматриваемых бассейнов;

– рассчитанные по формуле (3) и измеренные величины речного стока существенно отличаются между собой (см. табл. 3), что говорит о вкладе других (помимо изменения годовых величин P и PET) факторов в изменение речного стока (состояния растительного покрова, совпадения периодов максимальной увлажненности почвы и максимальных величин потенциального испарения, интенсивности и продолжительности осадков и др.). Роль прочих факторов в изменение R меняется в зависимости от

водосбора и рассматриваемого периода. Так, рост слоя стока в бассейне р. Турки на 18% за 1976–1995 гг. по сравнению с 1950–1975 гг. менее чем на 19% обусловлен изменением годовых величин P и PET . В то же время снижение слоя стока в бассейне р. Селенги на 27% за 1996–2016 гг. по сравнению с 1950–1975 гг. уже более чем на 75% обусловлено их изменением. Для рек бассейна Байкала изменение годовых величин P и PET в среднем лишь на 50% объясняет изменение нормы стока за 1976–1995 гг. и 1996–2016 гг. по сравнению с 1950–1975 гг. Этот факт важно учитывать при подборе критериев качества климатических моделей, используемых для прогноза изменения нормы годового стока, которые должны достоверно воспроизводить изменчивость не только годовых величин метеопараметров, но и их внутригодовое распределение. Также вероятно, что за 1950–2016 гг. изменение R в бассейне Байкала происходило, в том числе, в результате изменения свойств подстилающей поверхности (смена растительного покрова, деградация многолетней мерзлоты, обезлесивание), которые также следует учитывать при оценке будущих изменений речного стока.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-29-05027 офи_м). Полевые работы проводились в рамках проекта РФФИ 17-05-41174-РГО «Геохимические барьерные зоны в пресноводных дельтах рек России», создание ГИС – в рамках проекта 18-05-60219. Расчеты по модели ECOMAG были выполнены в рамках темы № 0147-2019-0001, (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: Наука, 1967. 231 с.
- Бабкин В.И. Речной сток и циклоническая деятельность в бассейнах Оби, Енисея и Лены. М.: Научный мир, 2017. 544 с.
- Баженова О.И., Кобылкин Д.В. Динамика процессов деградации почв в бассейне Селенги в сельскохозяйственный период // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 33–40.
- Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО», 2010. 227 с.
- Добровольский С.Г. Межгодовые и многолетние изменения речного стока в водосборном бассейне Байкала // Водные ресурсы. 2017. № 3. С. 231–242.
- Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Григорьев В.Ю. Возможность использования данных спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для оценки характеристик водного баланса крупных речных бассейнов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 4. С. 27–33.
- Марченко О.Ю. Условия формирования и долговременные изменения экстремальной водности в бассейне реки Селенги: дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2013. 127 с.
- Миллионщикова Т.Д. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019. 133 с.
- Сизова Л.Н., Шимараев М.Н. Циркуляция атмосферы и современные тенденции изменения речного притока озера Байкал // Природоохранное сотрудничество в трансграничных экологических регионах: Россия–Китай–Монголия. Вып. 3. Часть 2. Чита: Поиск, 2012. С. 135–139.
- Синюкович В.Н., Сизова Л.Н., Шимараев М.Н., Курбатова Н.Н. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.
- Синюкович В.Н., Чернышев М.С. О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал // Водные ресурсы. 2017. № 3. С. 256–263.
- Сутырина Е.Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 120–130.
- Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю. и др. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // Водные ресурсы. 2017. № 3. С. 1–13.
- Чалов С.Р., Гречушников М.Г., Варенцов М.И., Касимов Н.С. Современная и прогнозная оценка стока воды и наносов реки Селенги // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 39–48.
- Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
- Cable J.M., Ogle K., Bolton W.R. et al. Permafrost thaw affects boreal deciduous plant transpiration through increased soil water, deeper thaw and warmer soils. *Ecohydrology*, 2013, vol. 7, p. 982–997. DOI: 10.1002/eco.1423.
- Davi N.K., Jacoby G.C., Curtis A.E., Baatarbileg N. Extension of Drought Records for Central Asia Using Tree Rings: West-Central Mongolia. *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, p. 288–299. DOI: 10.1175/JCLI3621.1.

Dey P., Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 548, p. 278–290. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.014.

Gelfan A.N., Millionshchikova T.D. Validation of a Hydrological Model Intended for Impact Study: Problem Statement and Solution Example for Selenga River Basin. *Water Resour.*, 2018, vol. 45, Suppl. 1, p. S90–S910. DOI: 10.1134/S0097807818050354.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, p. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.

Kropp H., Lorant M., Alexander H.D. et al. Environmental constraints on transpiration and stomatal conductance in a Siberian Arctic boreal forest. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2017, vol. 122, p. 487–497. DOI: 10.1002/2016JG003709.

Mohammad A.A.Z., Bellie S., Ashish S. Assessment of global aridity change. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 520, p. 300–313. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.033.

Motovilov Yu., Gottschalk, Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, *Institute Report Series*, no. 105. May 1999, 88 p.

Mu W., Yu F., Li C. et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Soil Moisture Content on Different Growing Stages of Spring Maize. *Water*, 2015, vol. 7, p. 2990–3008. DOI: 10.3390/w7062990.

Pederson N., Leland C., Nachin B. et al. Three centuries of shifting hydroclimatic regimes across the Mongolian Breadbasket. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, vol. 178–179, p. 10–20. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.003.

Törnqvist R., Jarsjö J., Pietron J. et al. Evolution of the hydroclimate system in the Lake Baikal basin. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 519, p. 1953–1962. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.074.

Ukkola A.M., Prentice I.C. A worldwide analysis of trends in water-balance evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, vol. 17, p. 4177–4187. DOI: 10.5194/hess-17-4177-2013.

Поступила в редакцию 13.09.2019

После доработки 25.12.2019

Принята к публикации 06.07.2020

V.Yu. Grigor'ev¹, T.D. Millionshchikova²,
A.A. Sazonov³, S.R. Chalov⁴

IMPACT OF CHANGES IN THE MAIN CLIMATIC PARAMETERS ON RIVER RUNOFF IN THE BAIKAL LAKE BASIN DURING THE SECOND HALF OF THE 20TH AND THE EARLY 21ST CENTURY

The results of the analysis of 1950–2016 runoff changes of the Baikal Lake largest tributaries, namely the Selenga, Verkhnyaya Angara, Barguzin, Turka, Khara-Murin, Snezhnaya, Utulik and Bolshaya Rechka rivers, are presented. The influence of changing precipitation rate (P) and potential evapotranspiration (PET) on the changes in annual river runoff (R) for 1976–1995 and 1996–2016 compared to 1950–1975 is considered basing on the CRU TS data. The ECOMAG model was used to evaluate the R reproducing accuracy with various modifications of the Budyko formula using P and PET data. It was found that the difference between the R value calculated according to a formula and the modeled one is from 0.2 mm to 0.53 mm in the Selenga River basin with the P anomaly from –10% to +10%. It is shown that during 1950–2016 the Baikal Lake basin as a whole is characterized by the decrease in P and R and the increase in PET. Deviation of calculated R values from observed ones for 1976–1995 and 1996–2016 was interpreted as an influence of other factors, which include both the properties of the underlying surface and specific features of the intra-annual distribution of precipitation and potential evapotranspiration. The role of other factors in the change of R varies depending on the catchment and period under consideration. It is shown that P and E changes during 1950–2016 explain about 50% of the R change in the Baikal Lake basin. Susceptibility of river runoff in the Baikal Lake basin to factors other than P and PET must be taken into account while assessing the scenarios of runoff changes of the Baikal rivers under climate change. It was also revealed that in 1976–1995 (except for the Khara-Murin River) and in 1996–2016 (except for the Khara-Murin and Selenga rivers) the runoff formation conditions were more favorable than in 1950–1975.

Key words: long-term water balance, Budyko formula, the Baikal Lake, climate change, ECOMAG

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-29-05027 ofi_m). Calculations based on the ECOMAG model were performed within theme no. 0147-2019-0001 (state registration no. AAAA-A18-118022090056-0) of the State task to the IWP RAS.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Engineer, PhD. in Geography; Institute of Water Problems of RAS, Junior Scientific Researcher; e-mail: vadim308g@mail.ru

² Institute of Water Problems of RAS, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: tatyana.million@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Senior Lecturer; Institute of Water Problems of RAS, Engineer; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: hydroserg@mail.ru

REFERENCES

- Afanas'ev A.N. Kolebaniya gidrometeorologicheskogo rezhima na territorii SSSR [Fluctuations of the hydrometeorological regime within the territory of the USSR], Moscow, Nauka Publ., 1967, 231 p. (In Russian)
- Babkin V.I. Rečnoj stok i ciklonicheskaja dejatel'nost' v bassejnah Obi, Eniseja i Leny [River flow and cyclonic activity in the Ob, Yenisei and Lena river basins], Moscow, Nauch. mir Publ., 2017, 544 p. (In Russian)
- Bazhenova O.I., Kobylkin D.V. The dynamics of soil degradation processes within the Selenga basin at the agricultural period. *Geogr. Nat. Resour.*, 2013, vol. 34(3), p. 221–227. DOI: 10.1134/S1875372813030050.
- Cable J.M., Ogle K., Bolton W.R. et al. Permafrost thaw affects boreal deciduous plant transpiration through increased soil water, deeper thaw and warmer soils. *Ecohydrology*, 2013, vol. 7, p. 982–997. DOI: 10.1002/eco.1423.
- Chalov S.R., Grechushnikova M.G., Varencov M.I., Kasimov N.S. Sovremennaja i prognoznaja ocenka stoka vody i nanosov reki Selengi [Current and predictive assessment of water and sediment discharge of the Selenga River], *Geografija i prirodnye resursy*, 2016, vol. 37(5), p. 39–48. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-5(39-48). (In Russian)
- Davi N.K., Jacoby G.C., Curtis A.E., Baatarbileg N. Extension of Drought Records for Central Asia Using Tree Rings: West-Central Mongolia. *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, p. 288–299. DOI: 10.1175/JCLI3621.1.
- Dey P., Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 548, p. 278–290. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.014.
- Dobrovol'skii S.G. Year-to-year and many-year river runoff variations in Baikal drainage basin. *Water Resour.*, 2017, vol. 44(3), p. 347–358. DOI: 10.1134/S0097807817030083.
- Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigor'ev V.Y. et al. Many-year variations of river runoff in the Selenga basin. *Water Resour.*, 2017, vol. 44(3), p. 359–371. DOI: 10.1134/S0097807817030101.
- Garmaev E.Zh., Hristoforov A.V. Vodnye resursy rek bassejna ozera Bajkal: osnovy ih ispol'zovanija i ohrany [Water resources of the rivers of the Lake Baikal Basin: framework of their use and protection], Novosibirsk, Akademicheskoe izdatel'stvo «GEO» Publ., 2010, 227 p. (In Russian)
- Gelfan A.N., Millionshchikova T.D. Validation of a Hydrological Model Intended for Impact Study: Problem Statement and Solution Example for Selenga River Basin. *Water Resour.*, 2018, vol. 45, Suppl. 1, p. S90–S910. DOI: 10.1134/S0097807818050354.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, p. 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.
- Kropp H., Loranty M., Alexander H.D. et al. Environmental constraints on transpiration and stomatal conductance in a Siberian Arctic boreal forest. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2017, vol. 122, p. 487–497. DOI: 10.1002/2016JG003709.
- Marchenko O.Yu. Uslovia formirovanija i dolgovremennye izmenenija jekstremal'noj vodnosti v bassejne reki Selengi [Conditions of formation and long-term changes of extreme river flow in the Selenga River basin], PhD Thesis in Geography, Irkutsk, 2013, 127 p. (In Russian)
- Millionshchikova T.D. Modelirovanie i predvychislenie mnogoletnih izmenenij stoka r. Selengi [Modeling and projections of long-term changes of the Selenga River runoff], PhD Thesis in Geography, Moscow, 2019, 133 p. (In Russian)
- Mohammad A.A.Z., Bellie S., Ashish S. Assessment of global aridity change. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 520, p. 300–313. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.033.
- Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, no. 105, May 1999, 88 p.
- Mu W., Yu F., Li C. et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Soil Moisture Content on Different Growing Stages of Spring Maize. *Water*, 2015, vol. 7, p. 2990–3008. DOI: 10.3390/w7062990.
- Pederson N., Leland C., Nachin B. et al. Three centuries of shifting hydroclimatic regimes across the Mongolian Breadbasket. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, vol. 178–179, p. 10–20. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.003.
- Shimaraev M.N., Starygina L.N. Lake Baikal: Zonal Atmospheric Circulation, Climate and Hydrological Processes (1968–2007). *Geogr. Nat. Resour.*, 2010, no. 3, p. 245–250.
- Sinjukovich V.N., Sizova L.N., Shimaraev M.N., Kurbatova N.N. Characteristics of current changes in water inflow into lake Baikal. *Geogr. Nat. Resour.*, 2013, vol. 34, p. 350–355. DOI: 10.1134/S1875372813040082.
- Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Transformation of estimated characteristics of the annual and maximal runoff in the major tributaries of Lake Baikal. *Water Resour.*, 2017, vol. 44(3), p. 372–379. DOI: 10.1134/S0097807817030174.
- Sizova L.N., Shimaraev M.N. [Atmospheric circulation and current trends of river inflow to the Baikal Lake], «*irodoohrannoe sotrudnichestvo v transgranichnyh jekologicheskikh regionah: Rossiya-Kitaj-Mongolij*» [Environment-related cooperation in trans-border ecological regions: Russia-China-Mongolia], iss. 3, Part 2, Chita, Poisk Publ., 2012, p. 35–139. (In Russian)
- Sutyryna E.N. Reakcija stoka r. Selengi na izmenenie intensivnosti osadkov i sostojanija vodosbornogo bassejna [The response of the Selenga River runoff to the changes of rainfall intensity and the state of the catchment area], *Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Nauki o Zemle*, 2015, vol. 3, p. 20–130. (In Russian)
- Törnqvist R., Jarsjö J., Pietron J. et al. Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 19, p. 953–1962. DOI: /10.1016/j.jhydrol.2014.09.074.
- Ukkola A.M., Prentice I.C. A worldwide analysis of trends in water-balance evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, vol. 7, p. 177–4187. DOI: 10.5194/hess-17-4177-2013.
- Zotov L.V., Frolova N.L., Harlamov M.A., Grigor'ev Yu. Vozmozhnost' ispol'zovanija dannyh sputnikovoj sistemy izmerenija polja gravitacii Zemli (GRACE) dlja ocenki harakteristik vodnogo balansa krupnyh rechnykh bassejnov [Possible application of data of the satellite system of the Earth's gravity field measurement (GRACE) for the evaluation of water balance in river catchments], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 4, p. 27–33. (In Russian)

Received 13.09.2019

Revised 25.12.2019

Accepted 06.07.2020