

УДК 551.583:556.013

КЛИМАТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ФАЗУ ЗАМЕДЛЕНИЯ ПОТЕПЛЕНИЯ (1986–2015 гг.) И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА 2021–2030 гг.

Паромов Владимир Валериянович¹,

pvv0266@mail.ru

Земцов Валерий Алексеевич¹,

zemtsov_v@mail.ru

Копысов Сергей Геннадьевич^{1,2},

wosypok@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность. Наиболее очевидным проявлением климатических изменений в настоящее время является повышение приземной температуры воздуха. Региональные и локальные показатели изменения климата отличаются от глобальных. Происходит трансформация гидрологического цикла, водного баланса территории, стока рек, что, в свою очередь, сказывается на климатических процессах. Для предсказания реакции геосистем и их гидроклиматических ресурсов на климатические изменения необходимо иметь четкие представления о характере современных изменений климата и прогнозные оценки на ближайшие десятилетия с конкретной географической привязкой.

Цель работы: 1) оценка климатических изменений на территории Западной Сибири на основе статистического анализа рядов месячных температур воздуха и атмосферных осадков по состоянию на 2015 г., 2) прогноз поля средних за период 2021–2030 гг. температур воздуха и осадков и 3) определение климатообусловленных изменений водного баланса территории и режима стока воды.

Методы исследования. Анализ и прогнозирование пространственно-временной изменчивости наблюдаемой на метеостанциях региона приземной температуры воздуха и атмосферных осадков выполнены статистическими методами в пакете STATISTICA (регрессионный анализ, анализ трендов, кластер анализ для классификации объектов, экспоненциальное сглаживание и прогнозирование). Средние за базовый (1966–1985), современный (1986–2015) и прогнозный (2021–2030 гг.) периоды оценки составляющих водного баланса суши определены с месячным разрешением методом гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева.

Результаты. Показано, что современный 30-летний климатический период отличается от предыдущего более высоким энергетическим уровнем (температурами воздуха), но на этом фоне в некоторые месяцы наблюдаются не только восходящие, но и нисходящие тенденции температуры. Выполнен прогноз средних температур и осадков по 31 метеостанции на период 2021–2030 гг. за зиму и, по месяцам – за теплый период года. Оценки за современный и прогнозный периоды позволили рассчитать средние показатели режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы по данным метеостанций, расположенных в разных природных зонах Западно-Сибирской равнины. Прогнозируемый рост температуры и испарения не приводит к ожидаемому снижению стока даже в южных районах недостаточного увлажнения. В то же время влажность почвы в летний период, согласно расчетам, повсеместно снизится.

Ключевые слова:

Гидроклиматические ресурсы геосистем, водный баланс, Западная Сибирь, метод гидролого-климатических расчетов, температура воздуха, атмосферные осадки, анализ и прогнозирование временных рядов.

Западно-Сибирская равнина – одна из крупнейших аккумулятивных низменных равнин земного шара. Она простирается на площади почти 3 млн км² с севера на юг от берегов Карского моря до степей Казахстана, от Урала на западе до Енисея на востоке. Равнина имеет форму трапеции: расстояние от южной ее границы до северной достигает почти 2500 км, а ширина, соответственно на юге и севере, – от 1900 до 800 км. Равнинность территории обуславливает отчетливо выраженную зональность климата и ландшафтов Западной Сибири – от тундровых на севере до степных на юге.

Характерными последствиями глобального потепления, существенными для России и, в особен-

ности, Западной Сибири, являются увеличение температуры воздуха, изменение характера циркуляции атмосферы, изменение величины осадков и режима их выпадения, снежного покрова, влаго-содержания почвы, речного стока, деградация многолетней мерзлоты. Региональные и локальные показатели изменения климата отличаются от глобальных. Для предсказания реакции геосистем на климатические изменения (в нашем случае – гидрологических систем) необходимо иметь четкие представления о характере современных изменений климата и прогнозные оценки на ближайшие десятилетия с конкретной географической привязкой.

Состояние исследований

Результаты современных исследований изменения климата, в том числе в Западной Сибири, широко представлены и обобщены в [1–6]. С начала XXI в. обнаруживается замедление роста глобальной приземной температуры воздуха, разгорелась дискуссия о «наблюдаемой паузе в глобальном потеплении» [4].

Западная Сибирь и Центральная Азия, например, в 2004–2009 гг. стали евразийским центром локализации отрицательных трендов среднегодовой температуры воздуха [7]. Рассмотрение направленности трендов температуры за многолетний период приводит авторов указанной работы к выводу о наличии в изменении климата мощной колебательной составляющей естественного происхождения, демпфирующей прогнозируемое по глобальным моделям климата резкое потепление за счет усиления парникового эффекта. Еще более сильный отрицательный тренд имеет зимняя температура воздуха – в 1995–2015 гг. во всей Западной Сибири, за исключением прибрежных северных районов [8]. В [9] исследуется изменчивость среднегодовой температуры почво-грунтов на глубине 320 см и расчетной глубины их протаивания в зоне распространения многолетней мерзлоты на метеостанциях России в 1963–2011 гг. Исследование трендов этих параметров за весь указанный период и в 2001–2011 гг. показало в последнем случае отчетливый тренд понижения температуры – 0,2–0,6 °C/10 лет на востоке и юго-востоке Западной Сибири в секторе 70–90° в.д. Делается вывод, что изменения климата содержат мощную колебательную составляющую естественного происхождения, которая не слабее экспоненциальной составляющей, предвычисляемой по моделям глобального климата в зависимости от усиления парникового эффекта.

В докладе [4] показано, что с конца XX в. на территории России в формировании погоды зимой и летом ведущую роль играют блокирующие процессы в атмосфере. Тенденции понижения зимних температур связываются с изменчивостью атмосферной циркуляции [9]. В [10] рассмотрена изменчивость регионального климата собственно в Западной Сибири, в частности атмосферной циркуляции за период 1976–2014 гг. Показано, что потепление зимой сменилось похолоданием в 1985–2014 гг., связанным с ослаблением зонального переноса воздушных масс вследствие уменьшения меридионального температурного градиента.

Возможные механизмы формирования крупных погодно-климатических аномалий в последние годы в контексте глобальных изменений климата и естественных квазипериодических процессов обсуждаются в [11]. Экстремальные волны тепла и холода на территории России (экстремальная жара в Европейской части страны в 2010 г., наводнение на Амуре 2013 г.) связываются с формированием долговременных блокирующих антициклонов.

Частота их появления может возрастать по мере потепления климата. При этом нужно учитывать эффекты, относящиеся к региональным и глобальным естественным квазипериодическим процессам, таким, как атлантическое долгопериодное колебание, тихоокеанская десятилетняя осцилляция и явление Эль-Ниньо – южное колебание [11].

Добавим, что подобная ситуация блокирования западного переноса сложилась практически на всей территории Западной Сибири в 2011–2012 гг., когда, после засушливой осени 2011 г. и холодной зимы с малым количеством снега, весной и в начале лета максимальные расходы воды в половодье на реках Обь, Томь, Иртыш и их притоках в 2012 г. были экстремально низкими для соответствующих сезонов [12]. Возникли проблемы с наполнением Верхне-Иртышского каскада водохранилищ в Казахстане [13], Новосибирского водохранилища на Оби. В зоне многолетней мерзлоты на севере Западной Сибири равнины к августу почти высохли термокарстовые озера [14].

Н.В. Вакуленко и др. [15] обосновывают вывод, что современные глобальные климатические модели проекта SMIP-5, используемые для долгосрочного прогноза климатических изменений, не способны достаточно реалистично описать структуру температурной изменчивости в масштабах от одного до нескольких десятилетий. Эти модели предсказывают ускорение роста температуры, и они по своей разрешающей способности вряд ли могут учесть возможное продолжение перерыва в потеплении или даже некоторое похолодание в ближайшие одно–два десятилетия. Указанного недостатка, видимо, можно избежать путем совмещения многолетних трендов температуры, получаемых по ансамблям физико-математических моделей, со статистическим моделированием ритмов [16].

Таким образом, до настоящего времени нет достаточного понимания дальнейшей динамики климатических изменений. Интенсивность потепления в Западной Сибири, за исключением ее прибрежных арктических районов, заметно понижается в последние десятилетия. Данные за разные интервалы времени противоречивы. Глобальные климатические модели имеют слабые стороны в прогнозировании в масштабе одного–двух десятилетий – они учитывают в основном рост концентрации парниковых газов в атмосфере в длительной перспективе.

Гидрологический режим территории претерпевает определенные трансформации в процессе изменения климата [17]. Для оценки изменений водного баланса применяются разные гидрологические модели. В частности, в относительно слабо изученных в гидрометеорологическом отношении регионах для расчета водного баланса показал свою эффективность метод гидролого-климатических расчетов (ГКР) В.С. Мезенцева [18, 19], который позволяет задавать на входе прогнозные значе-

ния температуры воздуха, атмосферных осадков и параметров ландшафта (возможно, трансформированных климатическими изменениями) и получать на выходе характеристики водного баланса, соответствующие новым заданным условиям его формирования.

В ходе выполненного нами исследования решались следующие задачи: 1) оценка произошедших климатических изменений в Западной Сибири на основе статистического анализа рядов месячных температур воздуха и осадков за климатические сезоны года по состоянию на 2015 г., 2) статистическое прогнозирование полей средних значений этих характеристик на период 2021–2030 гг. и 3) исследование влияния изменения климатических характеристик за современный (1986–2015 гг.) и прогнозный (2021–2030 гг.) период на многолетние характеристики водного баланса и, в частности, режим «климатического» стока с месячным разрешением за теплый период года.

Исходные данные и методы исследования

На первом этапе исследована пространственно-временная изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферных осадков за 30-летний климатический период 1986–2015 гг. по отношению к норме. Для анализа изменения температуры воздуха и атмосферных осадков за зимний (ноябрь–март), летний (июнь–август) сезоны и за год использованы среднемесячные данные по 31 репрезентативным метеостанциям Росгидромета (рис. 1), относительно равномерно расположенным на Западно-Сибирской равнине (за исключением ее арктического побережья), за 1966–2015 гг. [20]. Метеостанции находятся в разных ландшафтных зонах, данные наблюдений на станциях, находящихся в крупных городах, не учитывались.

Ряды средних за выделенные сезоны и за календарный год приземных температур воздуха преобразовывались в значения отклонений от среднего за период 1966–1985 гг. (аномалии температур, ΔT °C), который был условно принят за базовый (климатическая норма), т. е. до начала современных климатических изменений. Выбор 1985 г. в качестве граничного объясняется тем, что с середины 1980-х гг. отмечается начало наиболее резкого потепления в Северном полушарии [21]. Этот выбор подкрепляется и результатами исследования многолетней изменчивости 72 показателей, включающих ключевые характеристики климатической системы (факторы) в совокупности с биотическими и абиотическими характеристиками наземных и морских экосистем (респонденты) на глобальном, региональном и локальном уровнях за период до 2010 г. [22]. Показано, что в 1980-х гг. произошло повсеместное существенное изменение, в ряде случаев скачкообразное, в режиме биофизических (включая гидрометеорологические) систем Земли, от верхней атмосферы до глубин океана и от Арктики до Антарктики. В каче-

стве причины такого изменения называется быстрое потепление климата, имеющее смешанную природу, как антропогенную, так и естественную.

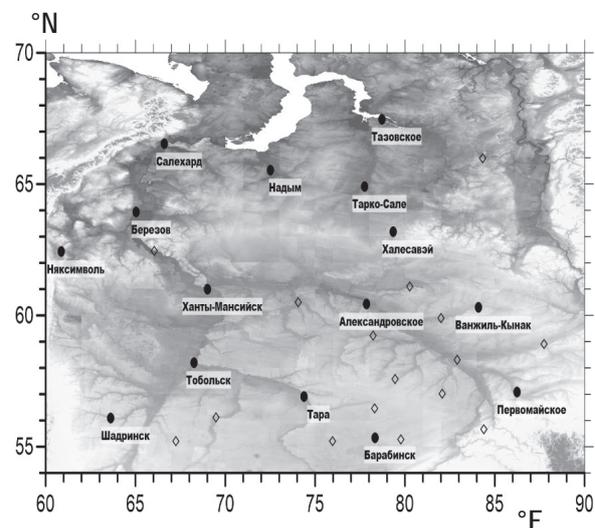


Рис. 1. Расположение 31 метеорологической станции Росгидромета, данные по которым использованы для прогноза на 2021–2030 гг. Данные 15 станций (черные кружки) использованы на первом этапе для более детального анализа климатических изменений

Fig. 1. Location of 31 meteorological stations of Roshydromet the data from which were used for the 2021–2030 forecast. Data from 15 stations (black solid circles) were also used at the first stage for more detailed analysis of climatic changes

Ряды сумм атмосферных осадков за соответствующие сезоны и в целом за календарный год были переведены в значения безразмерного модульного коэффициента k_x , показывающего отношение суммы осадков климатического сезона расчетного года (X_s) к среднемноголетнему ее значению за 1966–1985 гг. ($\bar{X}_{1966-1985}$):

$$k_x = \frac{X_s}{\bar{X}_{1966-1985}}$$

Полученные ряды ΔT и k_x сглаживались с помощью «4253H фильтра» в пакете StatSoft STATISTICA [23]. Этот мощный метод сглаживания (фильтрации) совмещает в себе несколько последовательных преобразований ряда скользящим средним и скользящей медианой. Он позволяет обнаруживать и отслеживать тенденции в рядах гидрометеорологических характеристик.

Для выявления географических особенностей изменения приземной температуры воздуха и осадков сглаженные ряды отклонений от нормы (аномалий) по 31 станциям подвергались регрессионному и кластер-анализу. В частности, принята попытка получить зависимости вида:

$$\Delta T = f(\varphi, \lambda) \quad \text{и} \quad k_x = f(\varphi, \lambda),$$

где φ – географическая широта и λ – географическая долгота метеостанции.

Кластер-анализ использовался в том случае, если не удавалось выявить статистически значимые зависимости показателей от географических координат. В результате кластер-анализа получены однородные по расчетному показателю районы со средними для района значениями отклонений от климатической нормы. В работе использовался иерархический алгоритм кластер-анализа – метод Уорда, в котором критерием качества кластеризации является процесс минимизации внутриклассовой дисперсии.

Статистическая значимость выявленных средних по районам значений отклонений от климатической нормы, как и исходных рядов ΔT и k_x , оценивалась путем анализа рядов на однородность непараметрическим критерием Манна–Уитни.

На втором этапе исследования для прогноза среднесезонных значений температур воздуха и атмосферных осадков на период 2021–2030 гг. индивидуально по каждой из 31 метеостанции (рис. 1) выполнено прогнозирование температуры и осадков с помощью адаптивной модели – метода экспоненциального сглаживания. Характерной чертой адаптивных моделей прогнозирования является наличие механизма самонастройки, позволяющего непрерывно учитывать изменения характеристик временного ряда [24]. Этот метод позволяет делать прогнозы на относительно короткие временные отрезки, когда наличие долговременных тенденций остается под вопросом.

Нами использовались модели экспоненциального сглаживания, включающие линейный либо демпфирующий тренды. При этом выбор модели тренда для каждого временного ряда выполнялся через визуальное оценивание графика наблюдаемых значений. Оптимальные значения используемых при сглаживании параметров α (Alpha), δ (Delta) и γ (Gamma) определялись в пакете STATISTICA автоматическим поиском. Для оценки качества подгонки в целом (для всего ряда) использовалась средняя абсолютная относительная ошибка. В свою очередь, для минимизации средней абсолютной относительной ошибки использовалась квази-ньютоновская процедура.

Полученное значение экспоненциальной средней S_t имеет то же математическое ожидание, что и исходный ряд X_t , но меньшую дисперсию. Следовательно, экспоненциальное сглаживание можно представить как фильтр, на вход которого в виде потока последовательно поступают члены исходного ряда, а на выходе формируются текущие значения экспоненциальной средней. При этом прогнозное значение экспоненциальной средней (\vec{S}_t) всегда имеет систематическую ошибку, т. е. оно смещено по отношению к истинной среднесезонной величине [24].

Для получения прогнозного значения средней за 2021–2030 гг. величины приземных температур воздуха и сумм атмосферных осадков (\vec{S}_t), как средних за сезон, так и за отдельные месяцы с ап-

реля по октябрь, взят базовый 40-летний ряд с 1976 по 2015 гг. Несмещенная среднесезонная величина (\vec{S}_t) находилась через ввод в найденные по соответствующей модели, значения \vec{S}_t поправки на смещение δs_t :

$$\vec{S}_t = \vec{S}_t \pm \delta s_t.$$

При этом оценка δs_t для каждого анализируемого ряда температур и осадков определялась через регрессионный анализ и получение регрессионной модели, параметры которой находились на основе сравнения экспоненциальной средней S_t (смещенной) и действительной средней \vec{X}_t найденных за период 2001–2015 гг. В качестве дополнительных предикторов таких зависимостей, улучшающих качество регрессионной модели, брались географические координаты метеостанций.

Результаты и обсуждение

Уровень климатических изменений в 1986–2015 гг. по отношению к норме. На территории Западной Сибири в последние 30 лет среднесезонные температуры воздуха по отношению к норме повсеместно увеличились. Температура зимы (не считая арктического побережья) в среднем за 30 лет статистически значимо выросла только южнее 62° с.ш., температура же летнего периода показала незначимый прирост на всей исследуемой территории (табл. 1).

Обнаруживается тесная связь аномалий среднегодовой температуры воздуха, а также среднесезонной температуры с географической широтой и долготой. За последние 30 лет прирост температуры зимы и года увеличивается с северо-запада на юго-восток. Для летних температур, которые увеличились в меньшей степени, чем зимние, характерна широтная зависимость – увеличение их прироста с юга на север.

Таблица 1. Средние отклонения приземных температур воздуха за 1986–2015 гг. от климатической нормы и их стандартные ошибки

Table 1. Mean deviations of surface air temperature in 1986–2015 from the climatic norm and their standard errors

Ландшафтные зоны Landscape zones	Величина отклонений Anomalies (°C)		
	Годовые Year (I–XII)	Зимние Winter (XI–III)	Летние Summer (VI–VIII)
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	1,2±0,8	1,1±1,1	1,1±0,8
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	1,1±0,5	1,5±1,4	0,6±0,8
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	1,0±0,5	1,4±0,8	0,5±0,5

Направленность изменения сумм годовых и сезонных осадков не так однозначна, как у приземной температуры воздуха (рис. 2). Наблюдается заметно более пестрая картина величины и знака измене-

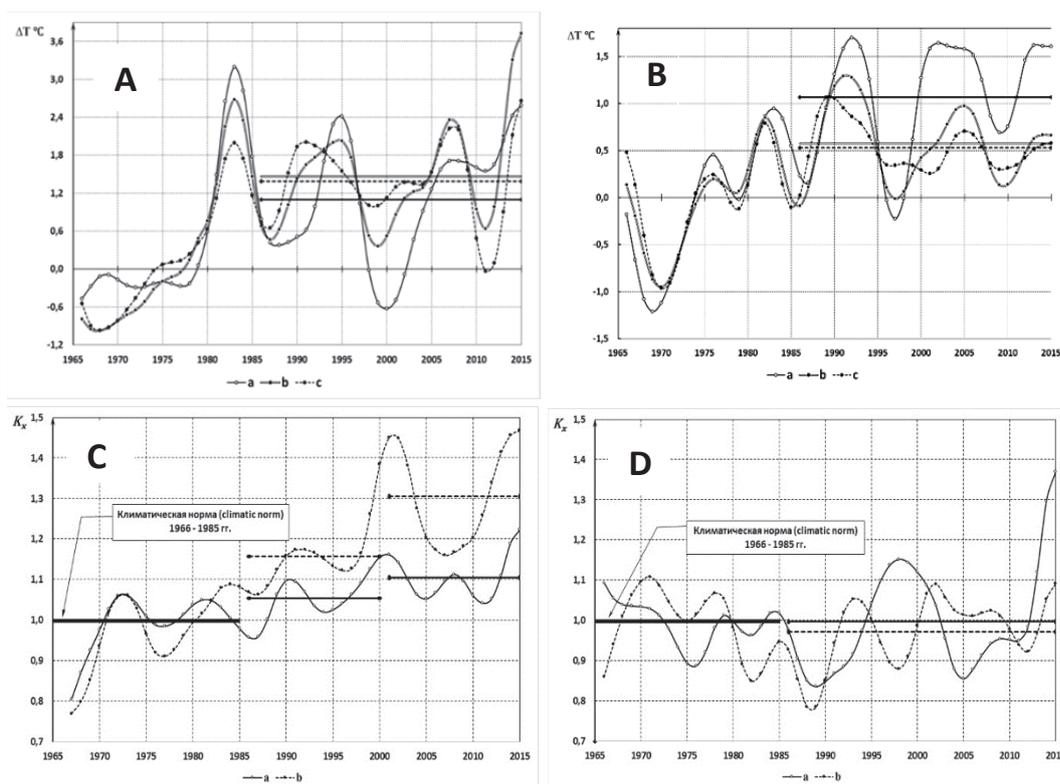


Рис. 2. Вариации температуры и осадков относительно нормы 1966–1985 гг. (сглаженные 4253Н фильтром): А, В – соответственно, зимние и летние температуры в лесотундре – северной тайге (а), средней – южной тайге (б), южной тайге – лесостепи (с); С, D – зимние и летние осадки севернее (а) и южнее (б) 62° с.ш.

Fig. 2. Variations of temperature and precipitation in relation to the 1966–1985 norms (smoothed using the 4253N filter): A, B are respectively, winter and summer temperatures in a) forest tundra to northern taiga, b) middle to southern taiga, c) southern taiga to forest steppe; C, D are winter and summer precipitation north (a) and south (b) from 62°N

ний. Тем не менее, удалось выявить общие закономерности, характерные для Западной Сибири.

Для сумм годовых осадков не удалось выявить какие-либо территориальные закономерности. На метеостанциях наблюдаются разнонаправленные отклонения от нормы, имеющие разную величину. В целом можно говорить о том, что по состоянию на 2015 г. на исследуемой территории осадки стационарны, т. е. примерно равны климатической норме.

Тем не менее, отмечается повсеместное увеличение зимних осадков в пределах рассматриваемой территории. Кластер-анализ показал, что южнее 62° с.ш. происходит более заметный рост осадков холодного периода – в среднем на 23 % по отношению к норме 1966–1985 гг., в то время как севернее прирост также наблюдается, но менее существенный – на 8 %.

Осадки летнего сезона в целом стабильны, однако выделяется область снижения летних осадков в центре Западно-Сибирской равнины, охватывающая таежную зону, подзону осиново-березовых лесов и лесостепь. Это Обь-Иртышское междуречье в пределах Среднеобской низменности и Васюганской равнины (метеостанции Ханты-Мансийск,

Александровское, Тобольск, Тара, Барабинск), где уменьшение осадков в среднем составило 3 %.

Интересно сравнить изменения температуры воздуха и осадков в первую и вторую половину рассматриваемого периода 1986–2015 гг. Особенностью потепления последних 30 лет на территории Западной Сибири, зафиксированной сетью метеостанций Росгидромета, явилось то, что на первом этапе (1986–2000 гг.) наиболее интенсивный рост температур наблюдался в лесостепной зоне, при этом основным «драйвером» роста годовых температур являлось интенсивное потепление холодного периода года. Но уже в первое десятилетие XXI в. наметилось либо замедление, либо остановка увеличения приземных температур воздуха зимнего сезона. Можно говорить о том, что произошел переход среднезимних температур на новый уровень: на 1,9 и 1,1 °C выше климатической нормы, соответственно, южнее и севернее 62° с.ш. в целом за 30-летний период.

Положительная малоинтенсивная динамика прироста среднелетних температур воздуха наблюдалась и в 2001–2015 гг., но только севернее 62° с.ш. Южнее рост летних температур прекратился. Темпы роста среднегодовых температур

практически остались без изменений, существенно замедлившись лишь на юге Западно-Сибирской равнины.

Атмосферные осадки на территории Западной Сибири за первые 15 лет (1986–2000 гг.) 30-летнего периода практически не изменились. Можно лишь отметить снижение летних осадков в лесостепной зоне, компенсированное их увеличением в холодный период года. Но во второе 15-летие (2001–2015) уже имеется статистически значимый прирост сумм зимних осадков на всей территории Западной Сибири, наметилось также увеличение как летних, так и годовых осадков в лесотундре и северной тайге.

Прогноз отклонения средних значений температуры воздуха и атмосферных осадков 2021–2030 гг. от климатических норм 1966–1985 гг. Зимой (ноябрь–март) в северной тайге и лесотундре (без учета арктического побережья) приземная температура воздуха снизится относительно средней за 1986–2015 гг. (табл. 2). На метеостанциях севера Западно-Сибирской равнины восходящая динамика роста температур зимы сменится на нисходящую, но среднесезонная температура останется выше климатической нормы. В среднем зима будет теплее, чем до 1985 г., на 0,4 °С, но холоднее, чем в 1986–2015 гг. В зоне средней и южной тайги прогрессирующее потепление холодного периода года также приостановится, среднесезонные температуры зафиксируются на уровне начала XXI в.

Таблица 2. Средние за разные периоды времени сезонные отклонения приземных температур воздуха и атмосферных осадков от климатических норм (1966–1985 гг.), осредненные по природным зонам

Table 2. The mean seasonal deviations of the near-surface air temperature and atmospheric precipitation in different time periods from the climatic norms (1966–1985), averaged over landscape zones

Ландшафтная зона Landscape zone	Период времени/Time period		
	1986–2000	2001–2015	2021–2030
Изменение средней за период температуры, °С (зима/лето) по отношению к норме Deviation of the temperature mean over the period, °С (winter/summer) from the norm			
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	+1,0/+0,4	+1,0/+1,2	+0,4/+1,5
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	+1,4/+0,3	+1,4/+0,6	+1,3/+0,7
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	+1,5/+0,6	+1,6/+0,5	+1,7/+0,6
Изменение средних за период осадков, в % (зима/лето) по отношению к норме Deviation of the precipitation mean over the period, % (winter/summer) from the norm			
Лесотундра – северная тайга Forest tundra to northern taiga	+4/–11	+12/+6	+18/+12
Средняя – южная тайга Middle to southern taiga	+6/–7	+18/–2	+23/+1
Южная тайга – лесостепь Southern taiga to forest steppe	+19/–7	+33/–14	+40/–12

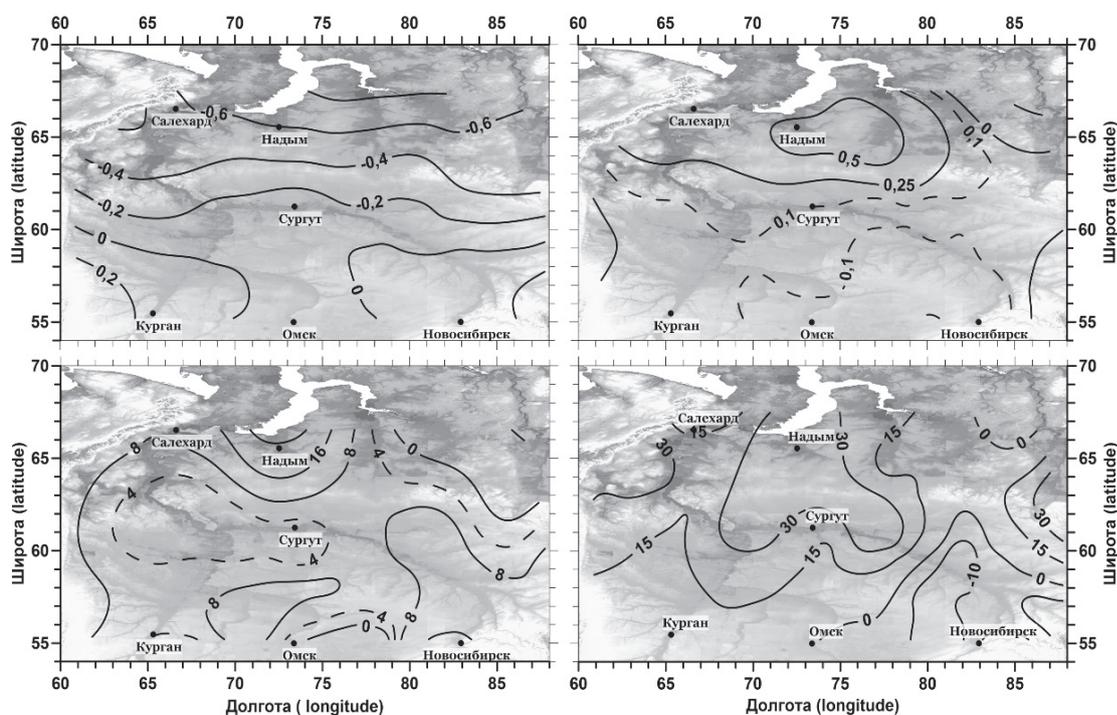


Рис. 3. Прогнозные изменения средних зимних (слева) и летних (справа) температур (сверху) и осадков (снизу) за 2021–2030 гг. с по сравнению с 2001–2015 гг.

Fig. 3. Predicted change in the mean winter (left) and summer (right) air temperatures (top) and precipitation rates (bottom) from 2001–2015 to 2021–2030

Возможной причиной таких изменений является естественная климатическая изменчивость, т. е. природная цикличность, например, связанная с 19-летним нутационным циклом, когда наблюдается изменение прихода солнечной радиации к земной поверхности во времени и по широтным зонам [25]. На юге исследуемой территории температура воздуха останется практически на уровне современной. Прогнозная сумма атмосферных осадков зимой в третьем десятилетии XXI в. будет заметно выше, чем в начале века.

Летние (июнь–август) температуры воздуха продолжают свой рост, при этом сохранится тенденция более интенсивного их прироста в северной тайге и лесотундре (севернее 62° с.ш.). Средняя величина отклонений температуры лета от климатической нормы на метеостанциях лесотундры достигнет 1,5 °С, а в таежной и лесостепной зоне потепление летнего сезона практически остановится, зафиксировавшись на уровне 2001–2015 гг. Сумма осадков теплого периода года на территории Западно-Сибирской равнины будет показывать разнонаправленные тенденции по направлению с северо-запада на юго-восток. Если на северо-западе равнины будет наблюдаться увеличение осадков, то в юго-восточном секторе – заметное снижение. В средней и южной тайге осадки в 2021–2030 гг. вернуться к уровню 1966–1985 гг. Подчеркнем, что прогнозы выполнены для зимы и лета по каждой из 31 метеостанции, показанной на рис. 1. По результатам такого точечного прогноза были составлены карты-схемы отклонений среднегогодовых атмосферных осадков и температур воздуха за 2021–2030 гг. от среднего уровня 2001–2015 гг. (рис. 3).

Для оценки изменений характеристик водного баланса за внутригодовой период сделаны прогнозы средних на 2021–2030 гг. температур и осадков за каждый месяц с апреля по октябрь, осредненные

по территории результаты приведены на рис. 4. При этом разделение на западную и восточную части Западной Сибири было сделано по той причине, что наблюдается различие в изменении осадков по направлению с запада на восток (в меридиональном направлении), а не как у температуры – в основном с севера на юг (рис. 5).

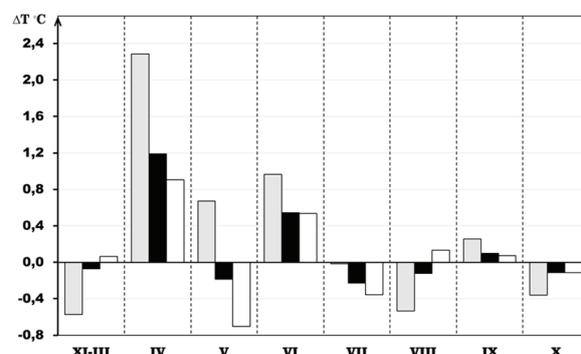


Рис. 4. Прогнозные изменения средних месячных температур воздуха в 2021–2030 гг. по сравнению с 2001–2015 гг. в лесотундре–северной тайге (выделено серым цветом), средней–южной тайге (черным) и южной тайге–лесостепи (белым цветом)

Fig. 4. Predicted change in the mean monthly air temperature from 2001–2015 to 2021–2030: in forest tundra to northern taiga (grey bars), middle to southern taiga (black bars), southern taiga to forest steppe (white bars)

Оценка средних показателей режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы за внутригодовой период по данным метеостанций за базовый (1966–1985), современный (1986–2015) и прогнозный (2021–2030) периоды. Результаты расчетов и прогнозов месячных и сезонных температур воздуха и атмосферных осадков использовались в качестве входной информации для моделирования водного баланса

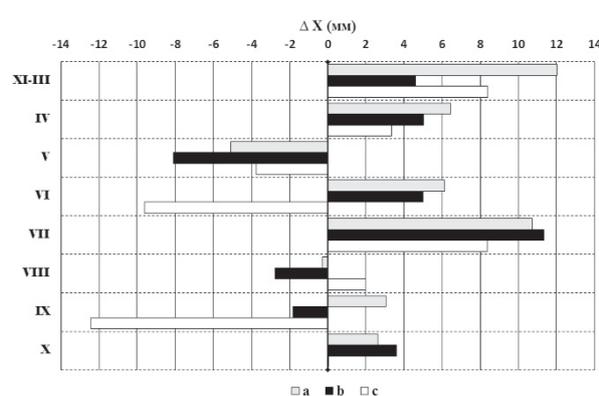


Рис. 5. Прогнозные изменения средних сумм месячных атмосферных осадков в теплую часть года в 2021–2030 гг. с по сравнению с 2001–2015 гг. в лесотундре – северной тайге (выделено серым цветом), средней – южной тайге (черным) и южной тайге – лесостепи (белым цветом): слева – западнее 73° в.д.; справа – восточнее 73° в.д.

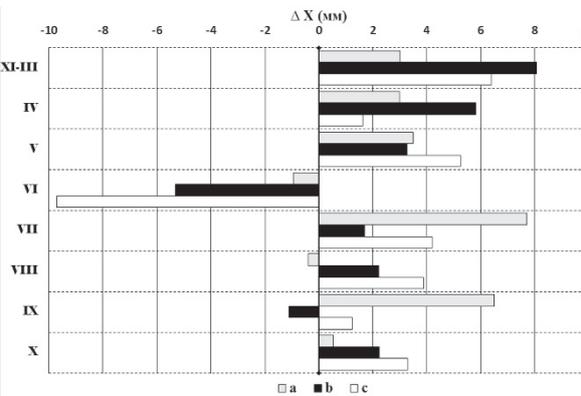


Fig. 5. Predicted change in the mean monthly precipitation rates from 2001–2015 to 2021–2030: in forest tundra to northern taiga (grey bars), middle to southern taiga (black bars), southern taiga to forest steppe (white bars): left – west from 73° E, right – east from 73° E

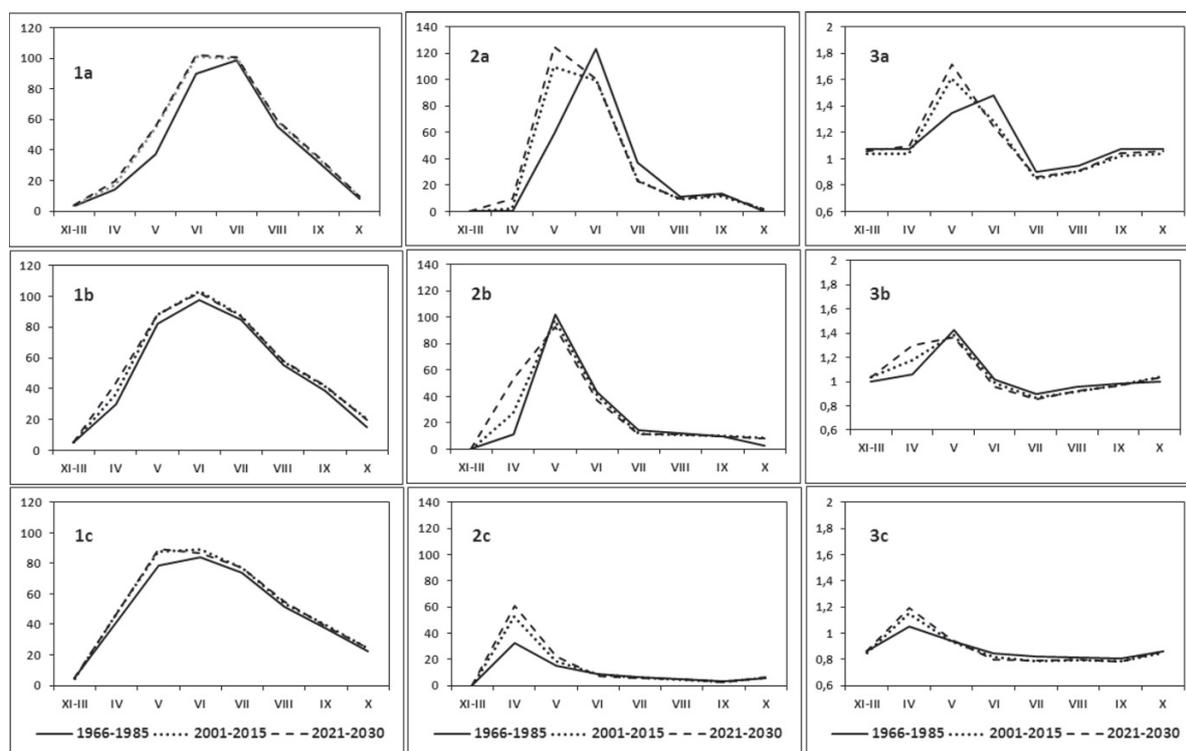


Рис. 6. Внутригодовая изменчивость рассчитанных по метеостанциям слоев испарения (1) (мм), «климатического» слоя стока (2) (мм) и относительной влажности деятельного слоя почвы (3), осредненных по территории трех зональных подразделений и по времени – за базовый, первую половину современного и прогнозный период. а) лесотундра – северная тайга; б) средняя – южная тайга; в) южная тайга – лесостепь

Fig. 6. Inter-annual variations of the calculated at meteorological stations (Fig. 1) evapotranspiration (1) mm, run-off depths (2) mm and relative moisture of soil active layer (3), averaged over territory of three zonal subareas and over time – over the basic, the first half of current and the forecast periods. а) forest tundra to northern taiga; б) middle to southern taiga; в) southern taiga to Forest steppe

(рис. 6). Переход от климатических показателей, полученных согласно конкретным сценариям изменения климата, к гидрологическим характеристикам с помощью моделей баланса тепла и влаги довольно широко используется на практике в нашей стране и за рубежом [26–30].

В данной работе мы используем модель гидролого-климатических расчетов В.С. Мезенцева:

$$Y = H - Z = (X + W_1 - W_2) - Z_M \left[1 + \left(\frac{X + W_1 - W_2}{Z_M} \right)^{-rn} \right]^{\frac{1}{n}},$$

в которой сток Y и испарение Z являются основными воднобалансовыми характеристиками ландшафта. Испарение Z определяется водным эквивалентом теплоэнергетических ресурсов испарения Z_M , суммарным увлажнением деятельной поверхности H , состоящим из суммы исправленных атмосферных осадков X и изменения влажности $(W_1 - W_2)$ деятельного слоя почвы за расчетный месячный период (все перечисленное определяется в мм), а также безразмерными параметрами: n , отражающим влияние ландшафтных условий фор-

мирования стока [31], и r , который характеризует способность почвы подводить воду к испаряющей поверхности и расходовать ее на испарение (зависит от гранулометрического состава грунта и водно-физических характеристик почвы, которые могут меняться в процессе изменения климата).

Величина Z_M вычислялась по сумме месячных температур выше 0°C с учетом затрат тепла на таяние снежного покрова и сезонной мерзлоты, а затем распределялась пропорционально дефициту влажности. Параметры r и n оцениваются в зависимости от определяющих их факторов и уточняются в процессе калибровки модели по величине стока воды с малых экспериментальных бассейнов и влажности деятельного слоя почво-грунта [32–34]. Для выявления роли именно климатических показателей параметры n и r для всех метеостанций принимались одинаковыми: $n=3$ (слабо-дренированная местность); $r=2$ (средний суглинок); $HВ=300$ мм (наименьшая влагоёмкость метрового слоя почвы). Содержание влаги в деятельном слое рассчитывалось с учётом мощностей деятельного слоя, которая определялась с учётом суммы отрицательных температур и высоты снега, вычисляемой по зимним осадкам.

На рис. 6, где показаны результаты модельных расчетов, хорошо фиксируется более раннее начало половодья, определяемое по месяцу перехода среднемесячной температуры воздуха через ноль весной, в лесотундре и тайге. За счёт увеличения зимних осадков увеличивается объем половодья и изменяется его форма. Суммарный объем климатического стока возрастает несмотря на рост испарения. Относительная влажность деятельного слоя, характеризующая отношение влагозапаса деятельного слоя к его наименьшей влагоёмкости, заметно увеличивается в весенний период и снижается в летний период. Наиболее заметные изменения прослеживаются между гидроклиматическими характеристиками базового (1966–1985) и прогнозного (2021–2030) периодов.

Заключение

В работе показано, что современный 30-летний климатический период отличается от предыдущего более высоким энергетическим уровнем (температурами воздуха). На этом фоне в некоторые месяцы наблюдались не только восходящие, но и нисходящие тенденции температуры воздуха.

Выполнен прогноз средних приземных температур воздуха и атмосферных осадков на 2021–2030 гг. за зиму и, по месяцам, – за теплый

период года. Эти данные необходимы для прогноза показателей водного баланса, в том числе климатического стока воды по данным метеостанций.

Оценки за базовый и прогнозный периоды позволили рассчитать средние показатели режима осадков, испарения, стока воды и влажности деятельного слоя почвы по данным метеостанций, расположенных в разных природных зонах Западно-Сибирской равнины.

Режим увлажнения территории формируется под воздействием теплоэнергетических ресурсов климата и атмосферных осадков при определенных (в том числе трансформирующихся при изменении климата) ландшафтных особенностях, определяющих пространственно-временное перераспределение стока. По этой причине прогнозируемый рост температуры, а значит и испарения, не приводит к ожидаемому снижению стока даже в южных районах недостаточного увлажнения. В то же время влажность почвы в летний период, согласно расчетам, повсеместно снизится.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14–05–00700 и гранта по Постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки РФ № 14B25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Задде Г.О., Катаев С.Г., Кусков А.И. Региональные климатические изменения метеорологических полей // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4. Природно-климатические изменения. – Томск: МП «Раско», 2000. – С. 11–56.
2. Касимов Н.С., Кислов А.В., Бабуринов В.Л. Регионы России: локальные последствия глобального потепления // Экология и жизнь. – 2012. – № 8. – С. 72–77.
3. Climate changes in Siberia / Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch., Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M., Vygodskaya N.N. // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. – P. 57–109.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Изд-во Росгидромета, 2014. – 1009 с.
5. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Климат: структура и динамика метеорологических величин на Азиатской территории России за 1975–2012 гг. // География Сибири в начале XXI века. Т. 2. Природа. Глава 4. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2015. – С. 117–137.
6. Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – 108–118.
7. Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата северного полушария Земли в последнее десятилетие // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. – 2010. – Вып. 175. – С. 43–51.
8. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы // Тр. Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 13–35.
9. Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial Features and New Trends in Thermal Conditions of Soil and Depth of its Seasonal Thawing in the Permafrost Zone // Russian Meteorology and Hydrology. – 2015. – V. 40. – № 2. – P. 73–78. DOI: 10.3103/S1068373915020016.
10. Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Yu.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – V. 41. – № 6. – P. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X.
11. Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and Climate Anomalies in Russian Regions Related to Global Climate Change // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – V. 41. – № 2. – P. 84–92. DOI: 10.3103/S1068373916020023.
12. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions / V.A. Zemtsov, V.V. Paromov, S.G. Kopysov, A.V. Kouraev, S.V. Negrul // International Journal of Environmental Studies. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 611–617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942530>.
13. Dynamics of the Irtysh River Floodplain Hydrology and Vegetation in the Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan / M.A. Beysembayeva, V.A. Zemtsov, V.A. Kamkin, K.U. Bazarbekov // Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts. Ch. 9 / Ed. by O.S. Pokrovsky. – Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 2016. – P. 211–230.
14. Impact of western Siberia heat wave 2012 on greenhouse gases and trace metal concentration in thaw lakes of discontinuous permafrost zone / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S.P. Kulizhsky, S.N. Vorobiev // Biogeosciences. – 2013. – V. 10. – P. 5349–5365. DOI: 10.5194/bg-10-5349-2013.

15. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change // Russian Meteorology and Hydrology. – 2015. – V. 40. – № 9. – P. 629–634. DOI: 10.3103/S1068373915090083.
16. Шерстюков Б.Г. Оценки точности статистической модели изменений климата по данным на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2010. – Вып. 175. – С. 20–32.
17. Hydrological changes: Historical analysis, contemporary status, and future projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.C. Smith, A.V. Chernokulsky // Regional Environmental Changes in Siberia and their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. – P. 111–154.
18. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 80 с.
19. Возобновляемые ресурсы теплоэнергообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик / И.В. Карнацевич, О.В. Мезенцева, Ж.А. Тусупбеков, Г.Г. Бикбулатова. – Омск: Изд-во Омского государственного аграрного университета, 2007. – 268 с.
20. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 07.02.2016).
21. Переведенцев Ю.П., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Современные глобальные и региональные изменения климата // Географический вестник. – 2006. – № 2. – С. 84–96.
22. Global impacts of the 1980s regime shift / P.C. Reid, R.E. Hari, G. Beaugrand, D.M. Livingstone, C. Marty, D. Straile, J. Barichivich, E. Goberville, R. Adrian, Y. Aono, R. Brown, J. Foster, P. Groisman, P. Hélaouët, H.-H. Hsu, R. Kirby, J. Knight, A. Kraberg, J. Li, T.-T. Lo, R.B. Myneni, R.P. North, J.A. Pounds, T. Sparks, R. Stübi, Y. Tian, K.H. Wiltshire, D. Xiao, Z. Zhu // Global Change Biology – 2016. – V. 22. – № 2. – P. 682–703. DOI: 10.1111/gcb.13106.
23. Sá Joaquim. Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R. – Berlin: Springer, 2007. – 505 p.
24. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
25. Федоров В.М. Пространственные и временные вариации солярного климата Земли в современную эпоху // Геофизические процессы и биосфера. – 2015. – Т. 14. – № 1. – С. 5–22.
26. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии / А.В. Кислов, В.И. Гребенец, В.М. Евстигнеев, В.Н. Конищев, М.В. Сидорова, Г.В. Суркова, Н.В. Тумель // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2011. – № 3. – С. 3–8.
27. Водный баланс заболоченных водосборных территорий Западной Сибири (на примере малой реки Ключ, Томская область) / О.Г. Савичев, А.А. Скугарев, В.А. Базанов, Ю.А. Харанжевская // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 39–46.
28. Roderick M.L., Farquhar G.D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties // Water Resour. Res. – 2011. V. 47. – W00G07. – 11 p. DOI: 10.1029/2010WR009826.
29. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield / G. Zhou, X. Wei, X. Chen, P. Zhou, X. Liu, Yi. Xiao, G. Sun, D.F. Scott, Sh. Zhou, L. Han, Y. Su // Nature Communications. – 2015. – V. 6. – Article number 5918. – 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918.
30. A two-parameter Budyko function to represent conditions under which evapotranspiration exceeds precipitation / P. Greve, L. Gudmundsson, B., Orłowsky S.I. Seneviratne // Hydrology and Earth System Sciences. – 2016. – V. 20. – P. 2195–2205. DOI: 10.5194/hess-20-2195-2016.
31. Копысов С.Г. Параметрический учёт ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 157–161.
32. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 380–385. DOI: 10.1080/00207233.2015.1010876.
33. Копысов С.Г. Расчет элементов водного баланса гидроморфных ландшафтов по водно-физическим свойствам почвенного покрова // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 1. – С. 26–30.
34. Копысов С.Г., Ярлыков Р.В. Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 115–121.

Поступила 28.12.2016 г.

Информация об авторах

Паромов В.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Земцов В.А., доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Копысов С.Г., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.