

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

УДК 556.132.6

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ В XXI в. В ЗОНЕ ТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ¹

© 2023 г. Е. Д. Надёжина^а, *, И. М. Школьник^а, А. В. Стерзат^а, А. А. Пикалёва^а

^аГлавная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Санкт-Петербург, 194021 Россия

*e-mail: nadyozhina@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Выполнены модельные оценки изменений фактического испарения бореальных лесов таежной зоны Европейской части России, обусловленные эволюцией климата в XXI в. Прогноз изменений климата выполнен на основе расчетных данных региональной климатической модели ГГО. Пространственная и временная детализация прогностических данных проводилась с помощью модели атмосферного пограничного слоя. Исследовались вариации прогнозируемых изменений, обусловленные использованием разных методов расчета испарения. Расчеты на основе дополнительного (взаимодополняющего) соотношения, определяющего фактическое испарение с использованием стандартных метеорологических параметров, сопоставляются с наблюдениями и расчетами на основе детальной модели энергопереноса в лесном массиве. Модельные значения фактического испарения в XXI в. увеличиваются на всей территории Европейской части России. Анализируется влияние интенсивности засушливых периодов на эволюцию фактического испарения. Показано, что, несмотря на увеличение аридности климата, влияние засушливых периодов на таежные леса будет умеренно негативным.

Ключевые слова: фактическое и потенциально возможное испарение, методы оценки, изменение климата, засушливый период, Европейская часть России.

DOI: 10.31857/S0321059623600096, **EDN:** EASPWC

ВВЕДЕНИЕ

Когда уходит такой неординарный человек, как Василий Николаевич Лыкосов, влияние его идей и трудов на науку остается на многие годы. Исследования структуры атмосферного пограничного слоя (АПС), выполненные Василием Николаевичем в разные годы, расширили и прояснили понимание взаимодействия процессов разного масштаба в пограничном слое атмосферы. Работы Василия Николаевича отличаются разнообразием тематики и интерес к изучению множества явлений, создающих взаимодействующие структуры в пограничном слое атмосферы. Еще в 1978 г. им были выполнены исследования взаи-

мосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера–почва, не утратившие своего значения и сейчас при постановке и решении актуальных задач влагопотребления и влагооборота.

Настоящая работа, посвященная анализу влагообмена в пограничном слое атмосферы над поверхностью сложной структуры, основана на использовании системы моделей, учитывающей взаимодействие процессов разного масштаба в пограничном слое атмосферы.

Суммарное испарение – важнейшая составляющая водного баланса. Оценкам испарения присущи значительные неопределенности, поэтому уточнение фактического испарения с различных естественных поверхностей составляет предмет анализа многочисленных исследований как предпринимавшихся в прошлом веке [10, 19], так и продолжающихся в последние годы [2, 4, 5, 7, 8, 14, 15, 24, 27]. Особый интерес вызывают прогнозы эволюции испарения, связанной с глобальным потеплением, региональные проявления которого существенно различаются. Прогнозы изменений испарения играют ключевую роль в

¹ Исследование выполнено при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (распоряжение Правительства РФ № 3240-р от 29 октября 2022 г.) в рамках НИР “Расширение системы климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории России в целях обеспечения адаптационных решений в отраслевом и региональном разрезе, включая борьбу с опустыниванием”.

оценках будущей водо-обеспеченности регионов, которая в свою очередь определяет эффективность функционирования не только социальной сферы и агросектора, но и лесного хозяйства. Необходимость адаптации методов ведения лесного хозяйства к изменяющимся климатическим условиям требует детализированного подхода к оценкам эволюции фактического испарения с поверхности лесных массивов в XXI в. При анализе эволюции испарения в лесных районах под влиянием климатических изменений широко используются методы, основанные как на модельных расчетах [2, 4, 5, 11, 17, 29], так и на данных натурных измерений [7, 8]. Каждый из указанных подходов к оценке испарения имеет неопределенности и преимущества.

Различают потенциальное и фактическое суммарное испарение (эвапотранспирацию (ЭТ)). Наиболее распространенные способы оценки фактической ЭТ предполагают предварительный расчет потенциально возможной ЭТ и использование эмпирических соотношений, позволяющих осуществить переход от потенциальной ЭТ к фактической. Существует ряд методов для разных временных и пространственных масштабов осреднения, которые позволяют рассчитать потенциальную ЭТ с учетом особенностей растительного покрова [10, 22, 30]. Широкое распространение, особенно в прикладных разработках, получил метод Пенмана–Монтейта (ПМ). Метод ПМ, модифицированный для поверхности с заданными характеристиками, рекомендован в качестве эталонной процедуры расчета ЭТ для сельскохозяйственных культур [10]. Этот метод находит применение и в тех случаях, когда возникает необходимость оценки потенциального испарения с поверхности лесного массива [18, 19]. Прогностические оценки испарения на территории зоны тайги Европейской части России (ЕЧР) выполнялись также с использованием детальной модели биофизических и биохимических процессов, регулирующих тепло-, водо- и газообмен в слое растительности и в атмосфере над этим слоем [6, 21].

Во многих исследованиях последнего времени анализ эволюции фактического испарения проводится на основе объективно существующей связи между фактическим и потенциальным испарением [4, 7, 8, 14] с привлечением метода дополнительного соотношения (ДС) (“complementary relationship”), предложенного Буше [12–14, 25]. На протяжении нескольких десятилетий обсуждается возможность применения метода Буше [12] для оценки фактического испарения с различных естественных поверхностей. Предложены линейные и нелинейные варианты соотношений между отдельными видами ЭТ, которые применяются в разных регионах [15]. Как показано в [7, 8], корреляционная связь между испарением с почвы и

испарением с водной поверхности удовлетворительно описывает эволюцию суммарного испарения с почвы, покрытой травой. В работе [7] анализируются изменения суммарного испарения за длительный период времени – с 1950-х гг. до 2010 г. – для разных растительных зон ЕЧР, в том числе для зоны тайги. Недавняя модификация метода ДС в работе [30] применена для оценки испарения с лесных массивов, включающих деревья разных пород. Представляет интерес анализ возможности использования метода ДС для оценки эволюции испарения в XXI в. в зоне тайги ЕЧР на основе прогноза климатических изменений в этом регионе. В настоящей работе исследуются возможные в будущем в зоне тайги ЕЧР изменения фактической и потенциальной ЭТ, рассчитанной разными методами с поверхности лесного массива, и выполняется их временная и пространственная детализация.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАБОТЕ

Оценки изменения испарения в зоне тайги в XXI в. основаны на данных об эволюции климата в этом регионе, которые получены с помощью системы глобальной (ГКМ), региональной (РКМ) моделей и модели атмосферного пограничного слоя (МАПС). Для описания климата на территории России в XX и XXI вв. проведены ансамблевые расчеты по глобальной климатической модели и встроеной в нее региональной модели. Технология построения ансамблей изложена в работе [9]. Численные эксперименты проводились для разных (случайных) начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для базового десятилетнего периода 1990–1999 гг. и для будущих условий для периодов 2050–2059 и 2090–2099 гг. с использованием сценария антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5 [26].

По пяти глобальным моделям CMIP5 заданы граничные условия на поверхности для десятилетних периодов, что обеспечило статистическую значимость расчета климатических характеристик. В настоящей работе использованы расчетные результаты РКМ, детализирующие для ЕЧР оценки климата, полученные на основе ГКМ ГГО. Пространственное разрешение РКМ составляет 25 км. Всего проведено по 50 расчетов для интервалов 1990–1999 (базовый), 2050–2059 и 2090–2099 гг. Таким образом, для каждого интервала в совокупности доступно по 500 лет расчетов регионального климата. Для детализации условий климатического воздействия на испарение в систему моделей ГКМ–РКМ добавлена модель атмосферного пограничного слоя (МАПС). Это позволяет обеспечить более адекватное физически воспроизведение структуры атмосферного пограничного слоя (АПС) внутри сеточной ячей-

ки РКМ при наличии лесной растительности. Модель АПС [3, 16] относится к классу мезо- γ -моделей, в ней использован полутурбулентный уровень замыкания по турбулентности. Численное решение системы уравнений АПС, дополненной соотношениями замыкания для масштаба и коэффициента турбулентности, отыскивается маршевым методом с дополнительными приближениями для нелинейных членов уравнений. К числу внешних параметров модели относятся: характеристики рельефа, шероховатость подстилающей поверхности z_0 , высота пограничного слоя атмосферы H , скорость геострофического ветра, радиационный баланс или температура на уровне $z = z_0$ или $z = 2$ м; температура и массовая доля влаги на уровне $z = H$. Методология выбора входных параметров модели АПС адаптирована к выдаче РКМ. Основное внимание в работе обращено на изменения испарения в зоне тайги.

Воспользуемся ДС для анализа эволюции фактического испарения с поверхности хвойного леса. Метод расчета основан на предположении о наличии связи между испарением с поверхности воды (или неограниченно увлажняемой поверхности) и ЭТ с поверхности, покрытой растительностью. В статье использовано ДС в той форме, которая приведена в работах [2, 27–30] для анализа ЭТ хвойного леса. Аналитическое выражение для описания этой связи по мере развития метода изменялось. Модифицированная форма ДС, предложенная в [13], уточнялась с использованием данных наблюдений. Соотношение между фактическим (ETa), потенциальным (ETp) и “дополнительным” (ETw) суммарным испарением записывается в следующем виде:

$$ETa = \left(\left(\frac{ETw}{ETp} \right)^2 (2ETp - ETw) \right), \quad (1)$$

где ETw – испарение с водной поверхности, аналогом которой может быть испарительный бассейн; ETp – потенциальное испарение с участка, покрытого растительностью. Для расчета ETw используется формула Пристли–Тейлора (ПТ) [22]:

$$ETw = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R - G). \quad (2)$$

Для расчета ETp используется формула Пенмана–Монтейта [10]:

$$ETp = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R - G) + \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) f(U2)(em - e), \quad (3)$$

где α – эмпирический коэффициент, R – радиационный баланс поверхности, G – поток тепла в почву, Δ – градиент кривой давления пара насыщения, γ – психрометрическая постоянная, $f(U2)$ –

функция влияния скорости ветра, $U2$ – скорость ветра на уровне 2 м, $(em - e)$ – дефицит влажности на уровне измерений. Оптимальный выбор α для конкретного вида растительности и почвы позволяет использовать соотношение (2) для описания фактической ЭТ. Для каждого конкретного региона выбор α осуществляется на основе экспериментальных данных. Отметим, что в работе [28] исследовалась зависимость расчетных значений ETa от выбора соотношений, определяющих ETp и ETw . Показано, что соотношение (1) для зоны вечной мерзлоты, для которой проводился анализ, в период полностью оттаявшей почвы приводит к совпадению измеренных и рассчитанных суточных значений ETa с вероятностью 0.89 [28]. В настоящей работе анализировались средние значения сезонных (с мая по сентябрь) сумм ETa , ETp и ETw за десятилетия 1990–1999, 2050–2059 и 2090–2099 гг. и межгодовая изменчивость этих характеристик.

Помимо сумм испарения за каждый месяц периода вегетации, отдельно рассчитаны годовые суммы испарения и суммы испарения в период метеорологических засух. По суточным данным в узлах сетки РКМ в каждом месяце с мая по сентябрь были выделены периоды, соответствующие условиям метеорологической засухи [9], определены продолжительность таких периодов и их термический режим. Для выделенных засушливых периодов по результатам ансамблевых расчетов РКМ в конце XX в., середине и конце XXI в. формируются массивы входных данных для МАПС. Затем с помощью МАПС для периодов засушливости выполняются оценки разных видов эвапотранспирации с участков поверхности, покрытых лесной растительностью, покрытых травой и с водной поверхности. Оценки выполнялись для засушливых периодов, наблюдавшихся в каждом месяце сезона вегетации. Отметим, что терминология, принятая в разных исследованиях, может различаться. В зарубежных исследованиях потенциальным испарением преимущественно считается испарение с любой поверхности, на которой поддерживается неограниченное поступление влаги к растениям (в случае модельных оценок это условие обеспечивается заданием насыщающей влажности в качестве граничного условия на поверхности). В дальнейшем потенциальное испарение с поверхности леса будет определяться заданием граничного условия на поверхности; модельные значения испарения с поверхности воды, полученные на основе формулы ПТ, будут указаны в каждом конкретном случае. Изменение увлажненности лесов таежной зоны оценивалось на основе вычисления “видимого испарения”. Видимое испарение, по определению, представляет собой “разницу между величинами испарения с поверхности воды и осадками за тот же период” [8]. Термин “видимое испарение” исполь-

Таблица 1. Суммарное испарение (мм) за теплый период (май–сентябрь) с поверхности почвы, воды и хвойного леса в таежной зоне ЕЧР

Регион	Данные из [7, 8]					Модельные оценки		
	поверхность почвы, покрытой травой		поверхность воды	видимое испарение	поверхность леса	поверхность воды	видимое испарение	
	весь период	1966–1986 гг.	1986–2010 гг.	1954–2010 гг.	1966–2010 гг.	1990–1999 гг.		
Вся зона тайги	313	319		318	–24	378	350	–33
Запад южной тайги	353	368	336	420	77	449	472	82
Восток южной тайги	320	316	323	383	28	431	420	44

зован в статье [8] для характеристики степени увлажненности поверхности суши на выделенной территории. В статье [8] испарение, измеренное с помощью испарительных бассейнов, отождествлялось с величиной потенциального испарения с поверхности суши, покрытой растительностью. В тех случаях, когда в тексте не уточняется конкретный метод оценки суммы испарения, для этой величины использовано обозначение *ET*.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК ИСПАРЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

Сопоставим полученные по РКМ и МАПС оценки испарения с поверхности лесного массива в изучаемом регионе с результатами других исследований. В работах [7, 8] выполнен анализ продолжительных (1951–2010 гг.) наблюдений и расчетных данных, описывающих эволюцию испарения в этот период. В указанных работах для зоны тайги ЕЧР анализируется потенциальное и фактическое испарение с поверхности суши, покрытой травой, испарение с водной поверхности, видимое испарение. После 1986 г. фактическое испарение при этих исследованиях не измерялось, а рассчитывалось на основе предложенной авторами связи между фактическим испарением и испарением с поверхности воды. В настоящей работе с этими характеристиками сопоставляются модельные данные по фактическому испарению с поверхности леса, испарению с поверхности воды и видимому испарению (табл. 1; рис. 1). Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов носит ориентировочный характер, поскольку существующие методы оценки испарения нуждаются в значительном уточнении и

периоды осреднения модельных данных и данных из работ [7, 8] не совпадают. Осреднение модельных данных проводится с учетом географического положения регионов, которые выбраны в качестве опорных в [7, 8] для описания специфики водообмена выделенных территорий на основе натуральных данных. Анализ оценок в табл. 1 показывает, что во всех случаях расчетное испарение с поверхности лесного массива оказывается большим, чем испарение с почвы, покрытой травой в этом регионе. Различия между величинами испарения зависят от периода осреднения данных по фактическому испарению из работы [7] и находятся в диапазоне 65–110 мм за сезон. Модельные значения испарения с поверхности воды, рассчитанные по формуле Пристли–Тейлора (2), отличаются от экспериментальных значений на 40–50 мм за сезон. Расчетные значения видимого испарения удовлетворительно согласуются с результатами исследований [7, 8].

Отметим, что основная особенность пространственного распределения испарения, отмеченная в [7, 8], – заметное различие величин испарения для западных и восточных регионов зоны тайги. Рис. 1 иллюстрирует качество расчетов по модели межгодовых изменений испарения для западных регионов зоны южной тайги, где имеется наибольшее число пунктов наблюдений [7, 8]. Из рис. 1 видно, что естественная межгодовая изменчивость исследуемых характеристик по данным наблюдений существенно больше, чем изменчивость расчетных значений. Результаты исследования [7] по эволюции испарения с поверхности, покрытой травой, наилучшим образом согласуются с расчетами по формуле ПМ при сравнении

как средних величин, так и изменчивости (рис. 1б).

ОЦЕНКИ БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ ИСПАРЕНИЯ В XXI в.

Разнообразие методов оценки испарения может приводить к различиям в оценках будущих изменений фактической и потенциальной ЭТ. В настоящей работе для расчета пространственных распределений будущих изменений испарения используются два метода: 1 – метод ДС; 2 – метод, основанный на модельном определении характеристик водо-, тепло- и газообмена в почве, растительности и приповерхностном слое атмосферы. В этом случае использованы корреляционные соотношения между климатическими нормами среднегодовой температуры и количества осадков и годовыми суммами ET_a и ET_p , полученными на основе модельных расчетов в работе [6]. С предположением универсальности этих соотношений для зоны тайги ЕЧР, на их основе проводятся расчеты годовых сумм ET_a и ET_p с использованием в качестве входной информации прогнозных оценок изменений климата, полученных с помощью системы моделей ГKM–PKM–MAPC.

Из рис. 2 видно, что пространственные распределения годовых сумм ET_a и ET_p , полученные разными методами, в целом согласуются удовлетворительно. Величины испарения, рассчитанные с помощью формул (1)–(3), несколько выше, чем величины испарения, рассчитанные с помощью корреляционных соотношений из работы [6]. Значения и пространственные распределения потенциального испарения, рассчитанного разными методами, согласуются лучше, чем характеристики фактического испарения. Пространственная картина распределений ET_a и ET_p , характерная особенностью которой – превышение сумм испарения в западных регионах зоны тайги по сравнению с испарением на востоке расчетной области, сохраняется в конце XXI в. Увеличение годовых сумм испарения характерно для всей зоны тайги. В этом регионе увеличение испарения в конце XXI в. по сравнению с базовым периодом составит от 75 до 100 мм за год по расчетам с помощью корреляционных соотношений. Разность между величинами испарения, полученными разными методами, мало меняется по территории и составляет в среднем ~100 мм/год. Пространственная изменчивость годовых уровней испарения, полученных по формулам (1)–(3), оказывается заметно большей, чем пространственная изменчивость этой характеристики, рассчитанной на основе корреляционных соотношений работы [6]. Анализ рис. 2б, 2г показывает, что скорость увеличения ET_a и ET_p может не совпадать.

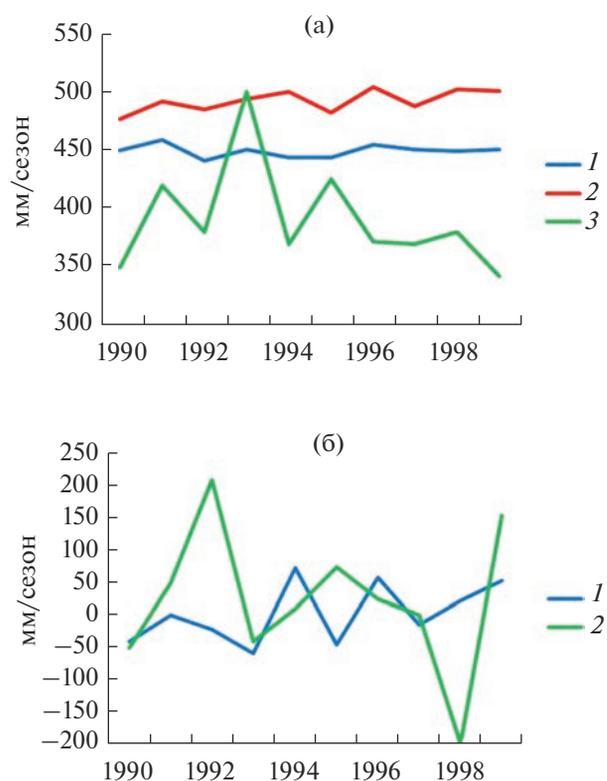


Рис. 1. Межгодовые колебания величин испарения за период 1990–1999 гг. в западной части зоны южной тайги. а – испарение с поверхности воды (1, 3) и потенциальное испарение с поверхности леса (2): 1, 2 – расчет по модели, 3 – данные наблюдений [7, 8]; б – видимое испарение: 1 – расчет по модели, 2 – данные наблюдений [7, 8].

Модельные результаты оценок эволюции фактического и потенциального испарения с поверхности леса в теплый период, рассчитанные для периода вегетации методом ДС в середине и в конце XXI в., иллюстрирует рис. 3, на котором показаны отклонения ET_a и ET_p от базовых значений. Оценки на основе соотношений (1)–(3) показали, что пространственная изменчивость отклонений испарения от базовых значений в зоне тайги в период вегетации не остается постоянной. Из рис. 3 видно, что фактическое и потенциальное испарение в теплое время года во всей расчетной области так же, как годовое испарение, увеличивается на протяжении XXI в. В середине XXI в. изменения фактического испарения, рассчитанного по формулам (1)–(3), практически однородны во всей зоне тайги. Некоторое уменьшение отклонений фактического испарения от базовых значений наблюдается в северо-восточной части расчетной области и в предгорьях Урала. В конце XXI в. отклонения сумм фактического испарения от базовых значений за сезон вегетации в западных регионах оказываются меньше (порядка 55–60 мм), чем в восточной части рас-

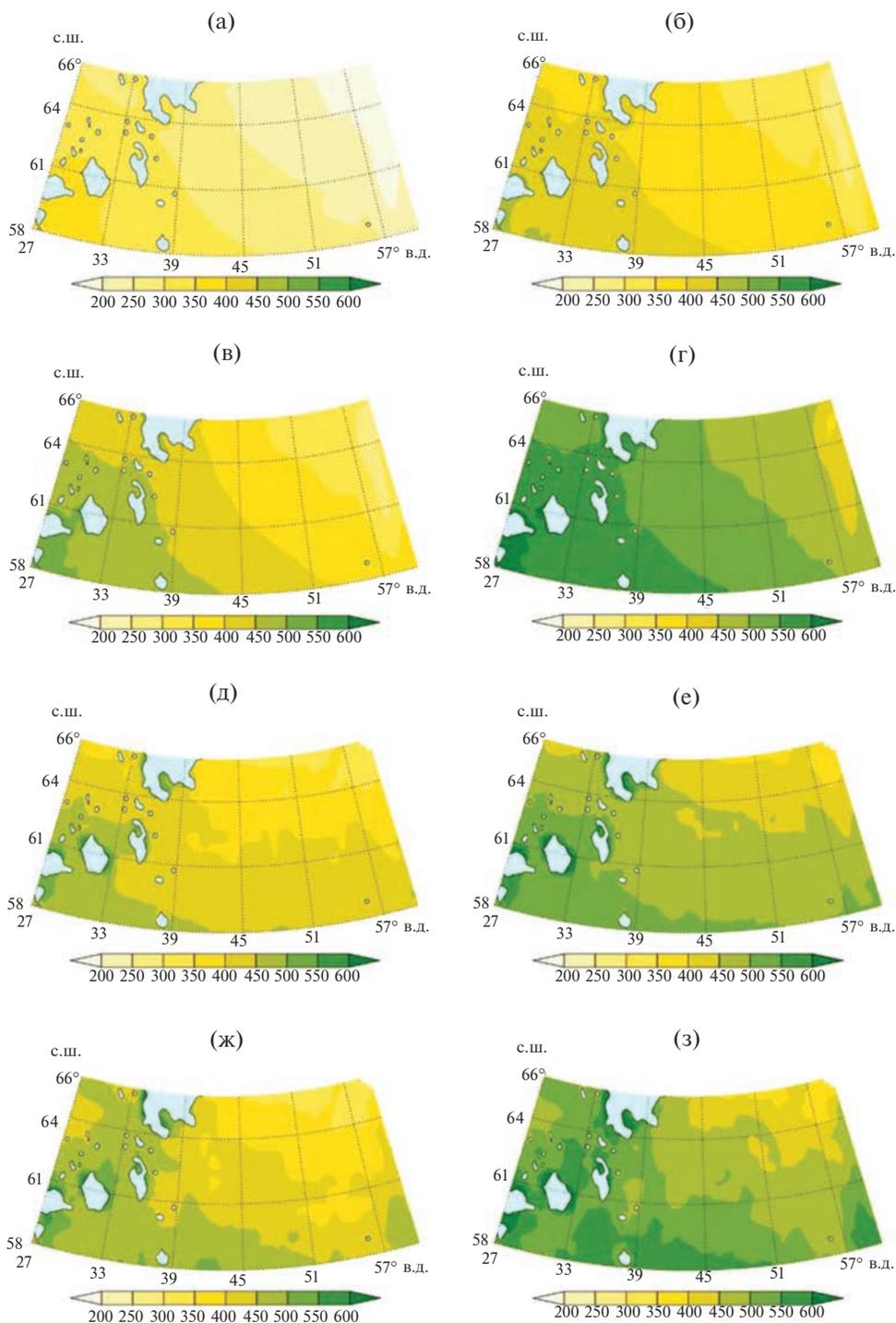


Рис. 2. Пространственное распределение испарения, рассчитанного разными способами (базовый период). а, б, д, е – фактическое испарение; в, г, ж, з – потенциальное испарение; а, в, д, ж – базовый период (1990–1999 гг.); б, г, е, з – конец XXI в. (2090–2099 гг.); а, б, в, г – расчет на основе корреляционных соотношений [6, 21].

четной области, где изменения фактической ЭТ (ET_a) достигают 75–80 мм. На небольшой территории, прилегающей к восточной границе расчетной области, изменения ET_a снова уменьшаются

до 55–60 мм. Модельные изменения потенциальной ЭТ различаются в отдельных регионах зоны тайги ЕЧР более заметно, чем изменения фактической ЭТ. В центральных и крайних восточных

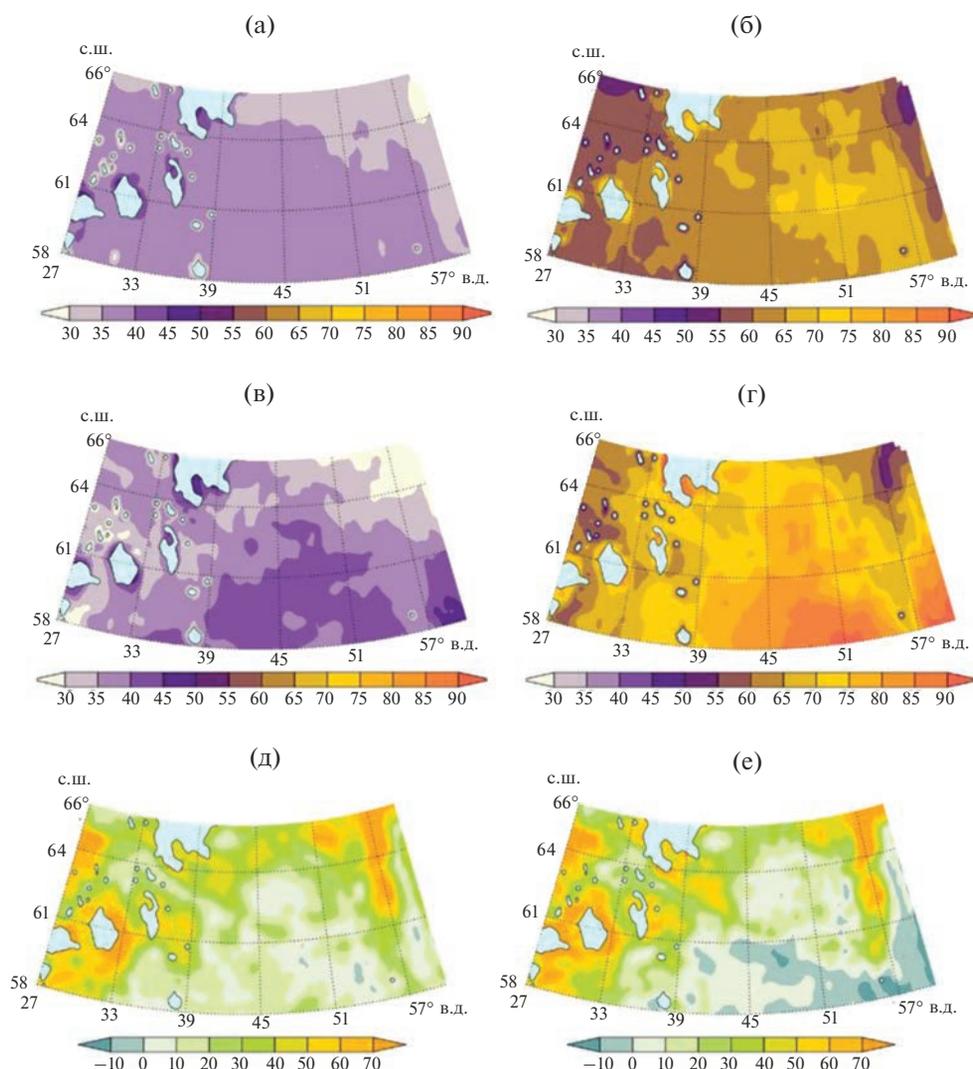


Рис. 3. Изменение сезонных сумм испарения, мм/сезон, в мае–сентябре в середине (а, в, д) и конце (б, г, е) XXI в. по отношению к базовому периоду. а, б – фактическое испарение с лесного массива; в, г – потенциальное испарение; д, е – разность сумм осадков.

регионах в зоне южной тайги максимальные изменения $ETp \geq 90$ мм. Пространственные распределения изменений ETp больше связаны с изменением поля осадков P (рис. 3д, 3е), чем изменения ETa . Сравнивая рис. 3в, 3е, можно видеть, что регионы, в которых наблюдается уменьшение осадков, практически совпадают с регионами максимального увеличения ETp . Это объясняется тем, что расчет ETp , по определению, предполагает наличие неограниченного доступа влаги на поверхности, отсутствие осадков уменьшает влажность в атмосфере и за счет повышения температуры поверхности увеличивает перепад влажности “поверхность – нижние слои воздуха”, приводя к увеличению вертикального влагопереноса.

Необходимо иметь представление о том, как повлияет изменение испарения и количества осадков на средние многолетние характеристики увлажненности разных регионов зоны тайги. Показатели увлажненности – один из основных факторов растительной зональности. Для описания степени увлажненности (или засушливости) региона в целом можно использовать индексы, основанные на информации о составляющих водного баланса. Индексы увлажненности, определяемые на основе данных об испарении, широко используются в прикладных исследованиях [20, 24, 27]. Форма записи индексов может быть разной. Широко распространены индексы, основанные на оценках относительной эвапотранспирации (“relative evapotranspiration”) [20]. Термин относительная ЭТ обозначает отношение факти-

ческой ЭТ к потенциальной ЭТ ($\delta = ETa/ETp$). Относительная ЭТ характеризует степень доступности влаги растениям. Изменения величины δ хорошо коррелируют с изменениями состояния растительности [20, 24], т. е. маркируют пороговые значения, приводящие к усыханию растений. В качестве показателя увлажненности поверхности суши используется также видимое испарение $ET - P$ [8]. В данном исследовании на основе модельных данных рассчитаны пространственные распределения индексов δ , аридности (сухости) ET/P [29] и видимого испарения $ET - P$ и выполнен анализ степени их соответствия друг другу. Следует иметь в виду, что в разных исследованиях $ET = ETa$ или $ET = ETp$ в зависимости от имеющейся информации. Средние за 10-летний период значения указанных индексов в таежной зоне показаны на рис. 4 для конца XX и конца XXI вв. Индексы рассчитаны на основе сумм ET и P за теплый сезон (май–сентябрь). Из рис. 4 видно, что все показатели отражают картину наличия увлажненных областей, вытянутых в меридиональном направлении в западных и восточных регионах таежной зоны ЕЧР в конце XXI в. При этом у восточных границ расчетной области увлажненность оказывается больше, чем в западной части таежной зоны. Такая же картина сохраняется в XXI в. Аридность климата к концу XXI в. существенно увеличивается, максимальное увеличение аридности наблюдается в центральных областях южной и средней тайги, где видимое испарение ~ 300 мм, индекс $ET/P \sim 2.5$, а область значений $\delta \leq 0.8$ расширяется в ~ 3 раза. Индексы увлажненности и аридности того или иного региона во многих литературных источниках рассчитываются на основе оценок потенциального испарения, поскольку расчеты фактического испарения имеют значительную неопределенность. Рис. 4 иллюстрирует количественные изменения пространственных распределений видимого испарения и индекса ET/P , вызванные заменой ETa на ETp . Естественно, в случае использования ETp расчетные значения индексов оказываются больше, изменения индексов выражены более заметно, но общая картина пространственных распределений практически не меняется.

Прогностические величины испарения интересно сопоставить с расчетными значениями фактической и потенциальной ЭТ бореальных лесов ЕЧС, полученными в [6] для периода голоцена на основе детальной модели тепло-владо-газообмена для бореальных лесов в таежной зоне ЕЧС. Климат периода голоцена, по мнению исследователей [1, 6], может служить аналогом климатического режима, прогнозируемого на конец XXI в. В работе [6] приведены годовые суммы ETa и ETp . В наиболее теплую фазу голоцена, по данным [6], $(ETa)_{\text{год}}$ составляет 430–450 мм/год, $(ETp)_{\text{год}}$ – 560–570 мм/год. По данным настоящего

исследования, полученным на основе ДС и относящимся только к периоду вегетации, ETa в конце XXI в. находится в пределах 425–525 мм/сезон, а ETp – в пределах 475–575 мм/сезон.

ИЗМЕНЕНИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗАСУШЛИВЫХ ПЕРИОДОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЕЧР И ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ РАСТЕНИЙ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ В ЭТИ ПЕРИОДЫ

Потепление климата в таежной зоне, приводящее к изменению средних показателей увлажненности этого региона, сопровождается увеличением частоты засушливых периодов. Засухи, практически отсутствовавшие в рассматриваемом регионе в XX в., в конце XXI в., по модельным данным, могут возникать в центральных и преимущественно восточных областях зоны южной и средней тайги с вероятностью 25–30% (рис. 5а). Анализ влияния климата на состояние лесов таежной зоны невозможен без исследования интенсивности метеорологических засух в плане эволюции ЭТ и соответствующих изменений растительности. От интенсивности засушливых периодов зависят индексы аридности и степень усыхания растительности. Исследования показывают, что именно доступность воды – основной ресурс для продуктивности леса [23, 27]. Выше (рис. 3) показаны изменения средних сезонных (май–сентябрь) распределений фактического и потенциального испарения с поверхности леса в XXI в. Период возникновения засух ограничен тремя месяцами с июня по август, поэтому отдельно проведен анализ изменения ETa и ETp за эти месяцы. Рис. 5 показывает, как пространственное распределение среднего за три месяца (июнь–август) отношения ETa/ETp (относительное испарение) изменяется в конце XXI в. по сравнению с базовым периодом конца XX в. и демонстрирует отличия этого распределения от распределения относительного испарения за весь период вегетации, включающий в себя месяцы без засушливых периодов. Пространственное распределение изменения сумм осадков в конце XXI в. за весь период вегетации (рис. 3д, 3е) и за три месяца (июнь–август) практически одинаково. В центральных регионах зоны южной тайги средние за три месяца значения относительного испарения преимущественно убывают. При этом зона характерных значений $ETa/ETp \leq 1$ существенно расширяется за счет увеличения доли засушливых периодов в рассматриваемые три месяца. В области снижения осадков в конце XXI в. средняя величина ETa/ETp за период июнь–август оказывается несколько меньшей, чем за весь сезон вегетации. В области снижения осадков при осреднении за весь период вегетации значения $0.87 \leq ETa/ETp \leq 0.92$ преобладают. В конце

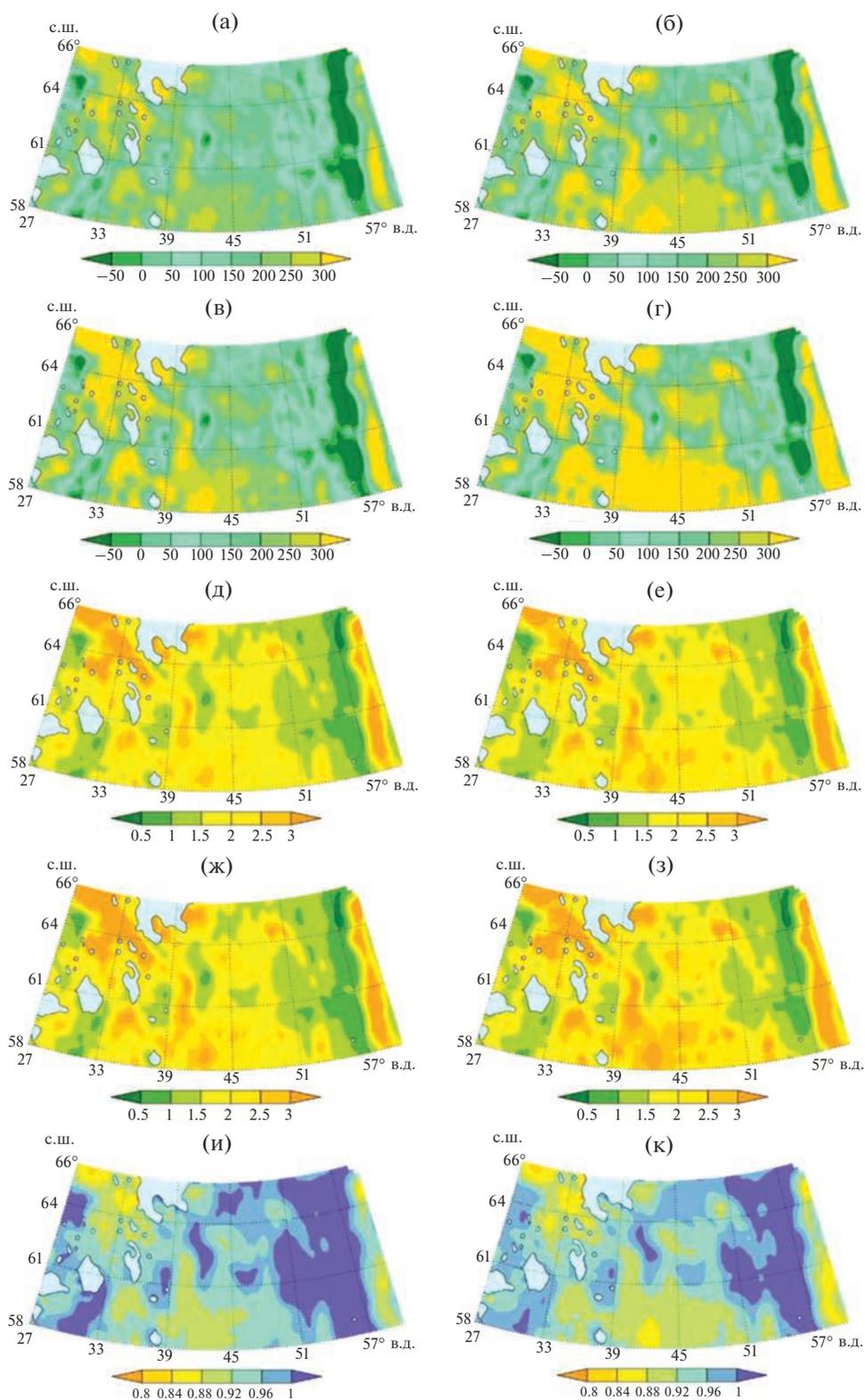


Рис. 4. Изменение индексов увлажнения. а, б – $(ETa - P)$; в, г – $(ETp - P)$; д, е – (ETa/P) ; ж, з – (ETp/P) ; и, к – (ETa/ETp) ; а, в, д, ж, и – базовый период; б, г, е, з, к – конец XXI в. (ETa рассчитано на основе ДС).

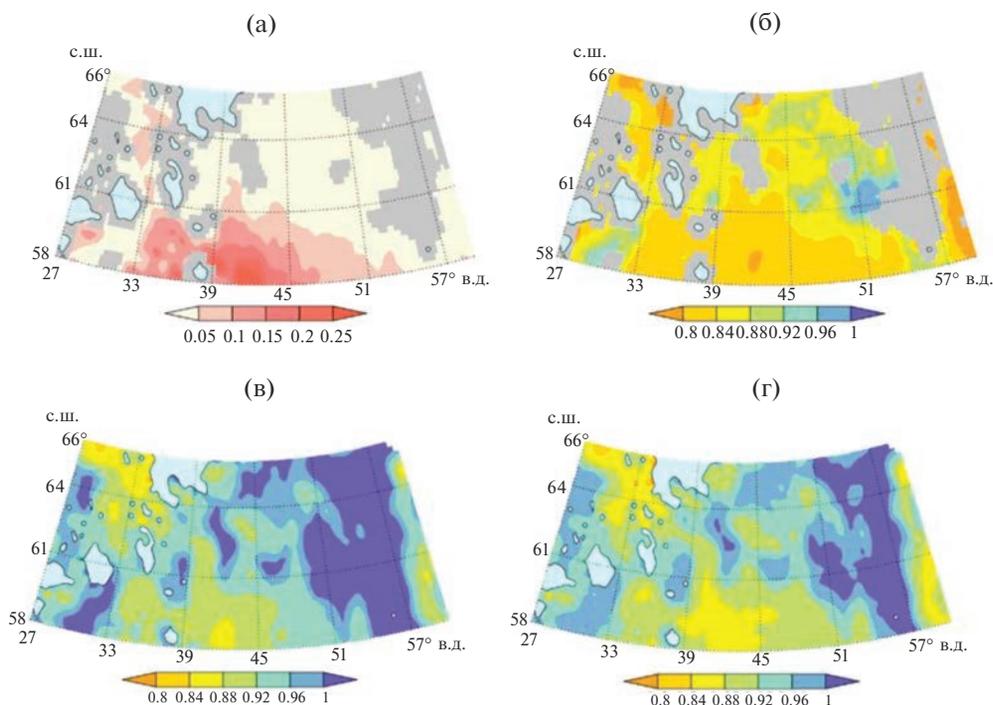


Рис. 5. Вероятность засушливых периодов (а) и относительное испарение (б, в, г). б — средние значения относительного испарения во время засушливых периодов в конце XXI в.; в, г — средние значения относительного испарения за июнь—август (в — базовый период; г — конец XXI в.).

XXI в. за период июнь—август значения $0.8 \leq ETa/ETp \leq 0.90$ в среднем характеризуют этот регион. На рис. 5г показано также распределение средних за период 2090–2099 гг. значений ETa/ETp в засушливый период. Из рис. 5г видно, что на территории, подверженной засухам, $ETa/ETp \sim 0.8$, что соответствует умеренной засушливости. Анализ показывает, что продолжительность засушливых периодов в основном составляет ~5 дней. Таким образом, хотя вероятность возникновения периодов засушливости к концу XXI в. увеличивается, продолжительность этих периодов относительно невелика и интенсивность их остается умеренной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных об эволюции климата, полученных с помощью системы моделей ГКМ—РКМ—МАПС, выполнены оценки изменения фактического и потенциального испарения с поверхности лесного массива в зоне тайги ЕЧР в XXI в. Расчет испарения проводился разными методами. Анализировались возможности широко используемого в современных исследованиях дополнительного соотношения для расчета фактического испарения. Испарение рассчитывалось для теплого периода (май—сентябрь), для трех месяцев (июнь—август), для которых в конце XXI в.

характерно наличие метеорологических засух, а также для засушливых периодов. Рассчитаны пространственные распределения средних за выбранные периоды значений ЭТ, отражающие фактический и потенциальный водообмен поверхности с нижними слоями атмосферы в разных регионах таежной зоны. Показано, что модельные оценки испарения, полученные с помощью испарительных бассейнов, удовлетворительно согласуются с расчетами по формуле Пристли—Тейлора, что подтверждает возможность использования этой формулы в дополнительном соотношении (1). Фактическое испарение ETa , рассчитанное на основе климатического прогноза с помощью системы моделей РКМ—МАПС, на протяжении XXI в. увеличивается на всей территории ЕЧР. Максимальное увеличение фактического испарения за сезон в центральных и восточных регионах зоны южной тайги составляет 75–95 мм. Модельные оценки позволяют выполнить анализ вклада засушливых периодов в расчетные значения исследуемых характеристик. Периоды засушливости, практически отсутствовавшие в рассматриваемом регионе в XX в., в конце XXI в., по модельным данным, могут возникать с вероятностью 25–30% в центральных и преимущественно восточных областях зоны южной и средней тайги (рис. 4а). На территории, подверженной засухе, относительное испарение $ETa/ETp \sim 0.8$, что

соответствует умеренной засушливости. Таким образом, хотя увеличение аридности климата в зоне тайги ЕЧР к концу XXI в. приведет к увеличению вероятности возникновения засушливых периодов, продолжительность этих периодов будет относительно невелика, а их интенсивность умеренной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенкова И.И., Зубаков В.А. Климатический оптимум голоцена как модель глобального климата начала XXI века // Метеорология и гидрология. 1984. № 9. С. 23–35.
2. Надёжина Е.Д., Школьник И.М., Стернзат А.В., Егоров Б.Н., Пикалева А.А. Испарение с орошенных участков в аридных регионах по оценкам системы моделей регионального климата и пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 87–97.
3. Надёжина Е.Д., Шкляревич О.Б. Адвективные туманы и гололед над склоном в прибрежных районах // Метеорология и гидрология. 1994. № 9. С. 20–28.
4. Надёжина Е.Д., Школьник И.М., Стернзат А.В., Егоров Б.Н., Пикалёва А.А. Модельные оценки эволюции климата и суммарного испарения в равнинных регионах Центральной Азии // Тр. ГГО. 2017. В. 586. С. 65–79.
5. Надёжина Е.Д., Школьник И.М., Стернзат А.В., Пикалёва А.А., Егоров Б.Н. Моделирование атмосферного пограничного слоя над неоднородно увлажненной поверхностью как инструмент для оценки суммарного испарения // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 27–38.
6. Ольчев А.В., Новенко Е.Ю. Испарение лесных экосистем центральных районов европейской территории России в голоцене // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 284–298. [http://www.matbio.org/2012/Olchev\(7_284\)](http://www.matbio.org/2012/Olchev(7_284))
7. Сперанская Н.А. Испарение с поверхности почвы с травяным покровом: доступные наблюдения и восстановленные данные // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2016. № 2. С. 49–60
8. Сперанская Н.А. Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской территории России за последние 50 лет // Вод. ресурсы. 2016. № 4. С. 661–672.
9. Хлебникова Е.И., Павлова Т.В., Сперанская Н.А. Засухи // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 126–164.
10. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and drainage paper. 1998. № 56. P. 333. <http://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/fao56.pdf>
11. Anderson M.C.J., Norman M., Mecikalski J.R., Otkin J.A., Kustas W.P. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U.S. based on thermal remote sensing: 1. Model formulation // J. Geophys. Res. 2007a. V. 112. D10117. P. 1–17. <https://doi.org/10.1029/2006JD007506>
12. Bouchet R.J. Evapotranspiration potentielle, et production Agricole // Annal. Agronom. 1963. V. 14. P. 743–824.
13. Brutsaert W. A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation // Water Resour. Res. 2015. V. 51. P. 8087–8093. <https://doi.org/10.1002/2015WR017720>
14. Gao Jiaqi, Miao Qiao, Xinfu Qiu, Yan Zeng, Huanhuan Hua, XiuzhiYe, Mustapha Adamu. Estimation of Actual Evapotranspiration Distribution in the Huaihe River Upstream Basin Based on the Generalized Complementary Principle // Advances Meteorol. 2018. Article ID 2158168. <https://doi.org/10.1155/2018/2158168>
15. Han S., Tian F. Complementary-principle-of-evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions // Hydrol. and Earth System Sci. 2020. <https://www.semanticscholar.org/paper>. <https://doi.org/10.5194/Hess-24-2269-2020>
16. Ivanova L.A., Nadyozhina E.D. Numerical simulation of wind farm influence on wind flow // Wind Engineering. 2000. V. 24. № 4. P. 257–271.
17. Kalma Jetse D., Tim R., McVicar Matthew, McCabe F. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data // Surv. Geophys. 2008. V. 29. P. 421–469. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9037-z>
18. Kelliher F.M., Leuning R., Schulze E.D. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands // Oecologia. 1993. V. 95. P. 153–163. <https://doi.org/10.1007/BF00323485>
19. Launiainen S., Guan M., Salmivaara A., Kieloaho A.-J. Modeling boreal forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: a spatial approach // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. V. 23. P. 3457–3480. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3457-2019>
20. Matthias J.R. Quantifying and modeling water availability in temperate forests: a review of drought and aridity indices // Biogeosci. Forestry. 2019. V. 12. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.3832/for2934-011>
21. Olchev A., Novenko E., Desherevskaya O., Krasnorutskaya K., Kurbatova J. Effects climatic changes on carbon dioxide and water vapor fluxes in boreal forest systems of the European part of Russia // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. № 045007. P. 1–8. <http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/4/045007>
22. Priestley C.H.B., Taylor R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters // Mon. Weather Rev. 1972. V. 100. P. 81–92.
23. Ruiz-Pérez G., Vico G. Effects of Temperature and Water Availability on Northern European Boreal Forests // Front. For. Glob. Change. Sec. Forest Hydrol. 2020. V. 3. P. 3–34. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00034>
24. Sörensson A.A., Ruscica R.C. Intercomparison and uncertainty assessment of nine evapotranspiration estimates over South America // Water Resour. Res. 2018. V. 54 (4). P. 2891–2908.

25. *Speranzkaya N.A.* New approach to analysis of pan and actual evaporation changes basing on the complementary relationship // Int. Sci. Conf. "Energy and Climate Change". Athens, 2011. P. 13–14.
26. *van Vuuren D.P., Edmonds J.M., Kainuma J. et al.* The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. V. 109. P. 5–31.
27. *Wang T., Zhang H., Zhao J., Guo X., Xiong T., Wu R.* Shifting contribution of climatic constraints on evapotranspiration in the boreal forest // Earth's Future. 2021. V. 9 (8). <https://doi.org/10.1029/2021EF002104>
28. *Yong Yang, Rensheng Chen, Yaoxuan Song, Chuntan Han, Zhangwen Liu, Junfeng Li.* Evaluation of five complementary relationship models for estimating actual evapotranspiration during soil freeze-thaw cycles. <https://doi.org/10.2166/NH.2021.093>
29. *Zhao H., Xu Z., Zhao J., Huang W.* A drought rarity and evapotranspiration-based index as a suitable agricultural drought indicator // Ecol. Indic. 2017. V. 82. P. 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.024>
30. *Zhipin Ai, Qinxue Wang, Yonghui Yang, Kiril Manevski, Xin Zhao, Deni Eer.* Estimation of land-surface evaporation at four forest sites across Japan with the new nonlinear complementary method // Sci. Rep. 2017. V. 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17473-0>