

УДК 551.582;551.588

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЛЕСИСТОСТИ И ЗАБОЛАЧИВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

© 2023 г. С. А. Лысенко^a, *, П. О. Зайко^a

^aГосударственное научное учреждение “Институт природопользования НАН Беларусь”,
ул. Ф. Скорины, 10, Минск, 220076 Республика Беларусь

*e-mail: lysenko.nature@gmail.com

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 22.12.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2023 г.

В статье представлены оценки потенциальных изменений климата Беларуси в результате проведения двух типов мелиорации – заболачивания и увеличения лесистости земель. Анализ выполнен для вегетационного периода (май–октябрь) на основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли, мезомасштабного моделирования атмосферных процессов и балансовых расчетов с использованием реанализа ERA5. Показано, что в результате заболачивания дневная температура подстилающей поверхности для южной части Беларуси (ниже широты Минска) понижается в пределах 1.5°C за счет увеличения испарения, а для северной – повышается в пределах 0.5°C за счет альбедных связей. Вочные часы заболачивание в зависимости от почвенно-климатических условий может обуславливать как повышение, так и понижение температуры подстилающей поверхности в пределах 1°C. Эвапотранспирация в результате заболачивания земель в северных районах Беларуси уменьшается, а в южных – увеличивается, что связано с принципиально различным соотношением между испарением и транспирацией в этих районах. При облесении пахотных земель дневная температура подстилающей поверхности на всей территории Беларуси понижается в пределах 2°C, а ночная – повышается в пределах 0.4°C. Суммарная для вегетационного периода эвапотранспирация за счет увеличения лесистости повышается в пределах 100 мм, а потенциальное (максимально возможное) испарение остается на прежнем уровне, что способствует увеличению увлажненности почв при неизменном количестве атмосферных осадков. Вышеотмеченные изменения физических характеристик подстилающей поверхности в результате мелиорации обусловливают понижение приземной температуры воздуха в мелиорируемом регионе в пределах 0.4°C и увеличение суммы атмосферных осадков в пределах 2% от климатической нормы. При этом максимум в пространственном распределении вторичных осадков за счет западного переноса смещается на восток по отношению к мелиорированному региону.

Ключевые слова: изменение климата, мелиорация, заболачивание, облесение, эвапотранспирация, мезомасштабное моделирование, рециркуляция осадков

DOI: 10.31857/S0002351523020049, **EDN:** HPBXZI

ВВЕДЕНИЕ

В последние четыре десятилетия отмечается беспрецедентное по скорости глобальное потепление, которое проявляется не только в росте средних температур, но и в существенных трансформациях окружающей среды, растительного и животного мира во многих регионах земного шара. В Беларуси среднегодовая температура растет со скоростью, втрое превышающей скорость глобального потепления [Лысенко, Буяков, 2020; Логинов и др., 2020]. Границы агроклиматических областей Беларуси, определяемые по годовой сумме активных среднесуточных температур выше 10°C, продвигаются в северном направле-

нии со скоростью около 12 км/год. Одновременно с ростом температуры воздуха происходит усиление засушливости климата Беларуси. Средняя для Беларуси разница между годовым количеством осадков и потенциальным испарением уменьшается со скоростью примерно 6 мм/год, а граница нулевого баланса между осадками и потенциальным испарением продвигается с юга на север Беларуси со средней скоростью около 19 км/год [Лысенко, Буяков, 2020]. В современный период потенциальное испарение превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей Беларуси. Среднее для Беларуси значение индекса аридно-

сти, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1980 по 2020 год уменьшилось на 30% и в современный период составляет примерно 0.8.

Наиболее уязвимым перед современным изменением климата является регион Белорусского Полесья, который в 1960–1970-е гг. подвергся осушительной мелиорации, приведшей в последствии к масштабной деградации торфяных почв в этом регионе. Данные наблюдений показывают, что климат мелиорированных территорий является наиболее экстремальным по ряду показателей: продолжительности и интенсивности заморозков, повторяемости зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, продолжительности периодов с высокой температурой воздуха и др. [Логинов и др., 2003; Шебеко, 1983]. Усиление засушливости климата этого региона оказывает крайне негативное влияние на продуктивность большинства местных (аборигенных) видов растительности, не приспособленных к новым климатическим условиям [Логинов и др., 2021]. Нехватка почвенной влаги особенно ощущается на биологической продуктивности пахотных земель Белорусского Полесья и урожайности сельскохозяйственных культур, традиционно выращиваемых в этом регионе [Логинов и др., 2020; Лысенко, 2019; Лысенко и др., 2022].

Принимая во внимание проблемы засух и деградации земель в Полесье, Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь совместно с ПРООН и партнерами с 1999 года ведутся проекты в области устойчивого управления водно-болотными угодьями и повторного заболачивания торфяников. С 2020 года в Беларуси реализуется Дорожная карта по осуществлению повторного заболачивания нарушенных торфяников и адаптации водных ресурсов Гомельской области к изменению климата, утвержденная Советом Министров Республики Беларусь.

По оценкам специалистов Института природопользования НАН Беларуси, испарение на территории Гомельской области Беларуси способно обуславливать около 5–10% общего количества атмосферных осадков, выпадающих в этом регионе в вегетационный период [Лысенко, Логинов и др., 2020]. Роль испарения наиболее существенна в начале лета (май–июнь), когда испарение и транспирация достигают своих максимальных значений. С июля по сентябрь вклад испарения в сумму атмосферных осадков составляет не более 5%. Полученные оценки в целом согласуются с результатами работ [Костин и др., 1961; Рахманов, 1984; Федоров и др., 1981; Федоров, 1977], в кото-

рых влияние переиспарения влаги на атмосферные осадки оценивалось в пределах 8–15%.

Экспериментальные наблюдения за микроклиматом после создания водохранилищ в пригородных зонах Беларуси показывают, что их воздействие проявляется в изменениях температуры воздуха, количества атмосферных осадков и ветрового режима в радиусе 250–300 м [Широков и др., 1986]. Ширина зоны изменений микроклимата по периметру водохранилищ неодинакова и трансформируется в зависимости от характера природы побережий. На сильно облесенных участках побережий зона влияния водохранилищ имеет минимальную ширину. На открытых и пологих участках (пашня, луг) она увеличивается в 1.5–2 раза. При этом на размеры зоны микроклиматических изменений существенное влияние оказывает направление преобладающих ветров. На территории Беларуси преобладают ветры западного направления, что связано с западным переносом атлантического воздуха умеренных широт и циклонической деятельностью на полярном и арктическом фронтах. В связи с этим, зона влияния водохранилищ на восточном побережье шире, чем на западном.

По данным исследований [Лихацевич, 2001] гидрогеологическое влияние мелиоративных систем в зависимости от типа торфяного месторождения, рельефа, свойств подстилающей поверхности и общей гидрогеологической ситуации простирается от 400–500 м до 5–7 км. Для условий Полесья эта величина оценивается в 1.5–3 км. С понижением уровня грунтовых вод испарение с подстилающей поверхности, как правило, уменьшается, однако, при сельскохозяйственном использовании осушенных территорий возрастает транспирация растений, поэтому суммарное испарение в сравнении с неосушенными или осушенными, но не освоенными болотами может даже увеличиваться [Шебеко, 1983].

Результаты моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на территории Восточно-Европейской равнины [Ольчев и др., 2017] показывают, что важную роль в формировании атмосферных осадков и температурного режима в теплый период года играет лесистость территории. При обезлесении модельной области (55° с.ш., 28° – 37° в.д.) в численных экспериментах отмечаются тенденции роста приземных температур и уменьшения количества атмосферных осадков, причем не только в модельной области, но и на значительном удалении от нее. Отмечается также увеличение продолжительности периодов с аномально жаркими погодными условиями, снижение повторяемости туманов и заморозков в мае и сентябре. В сценарии облесения модельной

области отмечаются обратные тенденции. В частности, сумма осадков с июня по июль увеличивается на 4.8% внутри модельной области и на 1.0% за ее пределами.

Климатические последствия мелиорации водно-болотных угодий и пахотных земель исследованы в работе [Li et al., 2018]. Результаты мезомасштабного моделирования показали, что осушение и урбанизация водно-болотных угодий, как и застройка пахотных земель приводят к увеличению приземной температуры воздуха и потока явного тепла с подстилающей поверхности. Влияние же землепользования на атмосферные осадки неоднозначно: при любых изменениях землепользования сумма осадков в одних районах увеличивается, а в других уменьшается так, что ее среднее значение практически не изменяется. В целом, исходя из работ зарубежных авторов [Bru-baker et al., 1993; Guo et al., 2018; Li et al., 2018], можно заключить, что прямая зависимость между испарением и атмосферными осадками на ограниченной территории суши отсутствует.

В настоящей работе предпринята попытка оценить потенциальные возможности смягчения неблагоприятных для Беларуси последствий изменения климата за счет увеличения лесистости и вторичного заболачивания ранее осущенных земель. В своих выводах авторы исходили из многолетних данных дистанционного зондирования Земли, мезомасштабного моделирования атмосферных процессов и балансовых расчетов на основе реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Приведенные в статье оценки получены для двух достаточно идеализированных сценариев мелиорации, предполагающих кардинальную трансформацию региональной структуры землепользования (замену пахотных земель на леса и заболачивание пахотных земель), и, поэтому, характеризуют лишь потенциальные возможности антропогенного регулирования регионального климата. Тем не менее, представленные ниже оценки дают количественное представление об эффективности различных мелиоративных мероприятий и могут служить отправной точкой для выработки рекомендаций по смягчению неблагоприятных последствий изменений климата для Республики Беларусь.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассматривалось два сильно идеализированных сценария изменения структуры землепользования на территории Беларуси: 1) замена всех пахотных земель на широколиственные леса, которые лучше современных хвойных лесов при-

способлены к новым климатическим условиям; 2) заболачивание всех пахотных земель. Предметом исследования были средние распределения по территории Беларуси приземной температуры воздуха и подстилающей поверхности, суммарного испарения (эвапотранспирации) и количества атмосферных осадков в вегетационный период (с мая по сентябрь). Под изменениями метеорологических параметров понимались разницы их средних величин до и после преобразования подстилающей поверхности (мелиорации).

Оценки изменений температуры подстилающей поверхности (LST), фактической (ET) и потенциальной (PET) эвапотранспирации основывались на данных спутникового спектрорадиометра MODIS за 2000–2020 годы. Эта задача решалась эмпирическим методом, основанным на попиксельном анализе методом скользящего окна геопространственных продуктов MOD11A1 V6.1 (дневная и ночная температура подстилающей поверхности) [<https://lpdaac.usgs.gov/documents/118/MOD11>] и MOD16A2 V105 (8-дневная эвапотранспирация) [<https://lpdaac.usgs.gov/documents/494/MOD16>]. На основе средних параметрических карт MODIS для исследуемого региона вычислялись средние значения параметров подстилающей поверхности в окрестности каждого пикселя при двух бинарных масках, задающих тип поверхности до и после мелиорации. Для этой цели использовалось скользящее окно радиусом 30 км и схема классификации подстилающей поверхности Global Land Cover 2019 (GLC2019), основанная на данных спутниковых приборов Европейского космического агентства [<https://land.copernicus.eu/global/products/lc>]. Значения LST, ET и PET для каждого пикселя, относящегося к подстилающей поверхности до мелиорации, заменялись их средними значениями в окрестности этого пикселя для подстилающей поверхности после мелиорации. Полученные путем такой замены карты изменений параметров подстилающей поверхности агрегировались по 118 административным районам Беларуси и осреднялись за весь доступный ряд наблюдений (с 2000 по 2020 годы) с целью получения оценок климатического воздействия мелиорации.

Для доступа к информационным продуктам MODIS использовалась облачная платформа Google Earth Engine, объединяющая множество доступных спутниковых данных и программные средства для их обработки и анализа [Gorelick et al., 2017]. Запрос на облачное хранилище, геопространственный анализ и пространственно-временное агрегирование спутниковых данных осуществлялись с использованием стандартного программного интерфейса пользователя Google Earth Engine на языке Python.

Для анализа изменений метеорологических параметров на мелиорируемой территории использовалась мезомасштабная негидростатическая численная модель атмосферы WRF 4.1 (Weather Research and Forecasting), применяемая в национальной гидрометеорологической службе Беларуси для краткосрочных прогнозов погоды [Skamarock, 2021]. Данная модель основана на интегрировании уравнений гидротермодинамики на прямоугольной сетке методом конечных разностей с параметризацией атмосферных процессов подсеточного масштаба (микрофизики, длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообмена в почве, конвекции, турбулентности и др.).

В качестве модельного региона с изменяемой структурой землепользования выбран регион Белорусского Полесья, содержащий наибольший процент мелиорированных земель ($51\text{--}53^\circ$ с.ш., $26\text{--}32^\circ$ в.д.). Структура землепользования в модельном регионе и во всем расчетном домене модели WRF ($48\text{--}56^\circ$ с.ш., $21\text{--}35^\circ$ в.д.) классифицировалась на основе данных GLC2019 [35], которые лучше стандартных данных WRF отражают современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси и имеют более высокое пространственное разрешение — 100 м [Лысенко, Зайко, 2021]. Численные эксперименты на модели WRF показывают, что повышение пространственного разрешения структуры землепользования повышает точность краткосрочных прогнозов приземной температуры на территории Беларуси [Лысенко, Зайко, 2021].

Подстилающая поверхность в классификации GLC2019 состоит из 23 классов, из которых к территории Беларуси в основном относятся семь — луга, пашни, переувлажненные (заболоченные) земли, хвойные, широколиственные и смешанные леса, урбанизированные (застроенные) территории. Замена в модели WRF одного типа подстилающей поверхности на другой выполнялась путем простого обновления файлов в системе подготовки данных WRF Preprocessing System. Для этого данные GLC2019 были переклассифицированы в стандартные для модели WRF категории землепользования и преобразованы в формат WPS Geogrid Binary, используемый системой подготовки данных WPS.

Метеорологические условия в исследуемом регионе моделировались для прошедшего периода с 1 мая 2015 г. по 30 октября 2015 г., в который было зафиксировано несколько сильных засух, нанесших большой ущерб лесному и сельскому хозяйству Беларуси [Логинов, 2020]. Моделирование метеорологических условий в этот период при различных вариантах землепользования

представляется наиболее интересным для выбора правильной стратегии адаптации к изменению климата и экологической реабилитации ранее мелиорированных земель. Помимо этого, учитывая тенденции увеличения продолжительности волн тепла и засушливых периодов, лето 2015 года можно рассматривать в качестве одной из проекций климата Беларуси на конец текущего столетия.

Мезомасштабные атмосферные процессы моделировались в расчетном домене $48\text{--}56^\circ$ с.ш., $21\text{--}35^\circ$ в.д. путем интегрирования полной системы уравнений гидротермодинамики с шагом по времени 54 с на пространственной сетке с горизонтальным разрешение 9 км, имеющей 33 вертикальных уровня до 5 гПа. В качестве начальных и граничных условий использовались сеточные данные реанализа ERA5 с равномерным разрешением по широте и долготе 0.25° , которые обновлялись каждые 12 часов моделируемого периода.

В нашем случае главным недостатком численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на мелиорируемой территории является сложность оценок климатических изменений, поскольку они потребовали бы чрезвычайно длительных вычислений. Особенно это касается оценок изменений атмосферных осадков, подверженных большой пространственной и временной изменчивости. В связи с этим для оценок влияния мелиорации на распределение атмосферных осадков использовался метод, основанный на квазистационарном приближении баланса влаги в единичном столбе атмосферного воздуха при длительных периодах осреднения [Brubaker et al., 1993; Guo et al., 2018; Li et al., 2018; Eltahir et al., 1994].

Влагосодержание атмосферного столба складывается из приходной части, формируемой поступлением влаги в результате процессов адвекции и местного испарения, и расходной, связанной с выпадением атмосферных осадков. При осреднении уравнения баланса атмосферной влаги за достаточно длительный промежуток времени (около месяца) его с достаточной степенью точности можно записать в стационарном приближении [Brubaker et al., 1993; Guo et al., 2018; Li et al., 2018]:

$$Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} + E - P = 0, \quad (1)$$

где Q_{in} и Q_{out} — количество влаги, привносимой за единицу времени в единичный столб атмосферы и выносимой из него в результате адвекции, E — суммарное испарение (эвапотранспирация), P — скорость выпадения атмосферных осадков. Все величины, входящие в уравнение (1), имеют размерность $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и соответствуют их средним значениям за выбранный период.

Уравнение (1) можно записать отдельно для влаги, образующейся за счет адвекции и за счет переиспарения ранее выпавших осадков (рециркуляции осадков). В первом из этих уравнений будет отсутствовать компонента E , а во втором – компонента Q_{in} . Искомой неизвестной в этих уравнениях будет доля общего количества осадков, обусловленная местным испарением R , которую в дальнейшем будем называть индексом рециркуляции осадков R . Для его нахождения часто вводится дополнительное предположение, что атмосферные осадки, обусловленные адвекцией влаги P^a и местным испарением P^r , пропорциональны соответствующим потокам влаги Q_{out}^a и Q_{out}^r [Brubaker et al., 1993; Guo et al., 2018; Li et al., 2018]. В этом случае индекс рециркуляции осадков можно легко рассчитать по известным значениям суммарного испарения E и адвективного потока влаги Q_{in} :

$$R = (1 + Q_{\text{in}}/E)^{-1}, \quad (2)$$

Данный метод можно несколько модифицировать для получения пространственного распределения осадков, выпадающих в результате местного испарения [Eltahir et al., 1994]. Для этого введем сетку географических координат с узлами в точках $x_j = j\Delta x$ и $y_i = i\Delta y$ ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$), где Δx и Δy – шаги сетки по широте и долготе, на которой зададим значения испарения E_{ij} , осадков P_{ij} , зонального F_{ij} (направленного на восток) и меридионального G_{ij} (направленного на север) потоков влаги. Записав уравнение (1) для общей и рециркулирующей влаги в узлах данной сетки и используя предположение о пропорциональности средних за длительный промежуток времени значений адвективных потоков и скоростей выпадения осадков для влаги разного происхождения, несложно получить расчетные формулы для индекса рециркуляции осадков [Логинов, 2020; Eltahir et al., 1994]:

$$\begin{aligned} R_{ij}^v &= \frac{\left(Q_{\text{in}}^r\right)_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y}{\left(Q_{\text{in}}^{\text{tot}}\right)_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y}, \\ \left(Q_{\text{in}}^{\text{tot}}\right)_{ij} &= \left(F_{i,j-1/2}^{\text{in}} + F_{i,j+1/2}^{\text{in}}\right)\Delta y + \\ &\quad + \left(G_{i-1/2,j}^{\text{in}} + G_{i+1/2,j}^{\text{in}}\right)\Delta x, \\ \left(Q_{\text{in}}^r\right)_{ij} &= \left(F_{i,j-1/2}^{\text{in}} R_{i,j-1}^{v-1} + F_{i,j+1/2}^{\text{in}} R_{i,j+1}^{v-1}\right)\Delta y + \\ &\quad + \left(G_{i-1/2,j}^{\text{in}} R_{i-1,j}^{v-1} + G_{i+1/2,j}^{\text{in}} R_{i+1,j}^{v-1}\right)\Delta x, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\left(Q_{\text{in}}^{\text{tot}}\right)_{ij}$ и $\left(Q_{\text{in}}^r\right)_{ij}$ – средние скорости поступления общей (верхний индекс “tot”) и рециркулиру-

ющей (верхний индекс “ r ”) влаги в элементарную пространственную ячейку за счет ее адвекции из соседних ячеек; $F_{i,j\pm 1/2}^{\text{in}}$ и $G_{i\pm 1/2,j}^{\text{in}}$ – притоки влаги в ячейку вдоль координатных осей x и y соответственно, которые рассчитываются по известным сеточным значениям зональных и меридиональных потоков $F_{i,j\pm 1}$ и $G_{i\pm 1,j}$, $v = 1, 2, \dots$ – номер итерации (поскольку в формулу для коэффициента рециркуляции в узле сетки (i, j) входят его значения для соседних узлов, то решение уравнений (3) производится методом последовательных приближений).

Для расчета внутреннего влагооборота на территории Беларуси нами использовались среднемесячные данные по испарению, осадкам и интегральным по вертикальной координате потокам влаги в зональном и меридиональном направлениях, взятые из реанализа ERA5. Распределение атмосферных осадков, сформированных в результате местного испарения, рассчитывалось для каждого административного района Беларуси на основе итерационного решения системы уравнений (3). Трансформация поля атмосферных осадков, вызванная мелиорацией в анализируемом районе, оценивалась по формуле:

$$\Delta P(x, y) = \overline{P_{\text{ERA}}}(x, y)R_{\text{ERA}}(x, y)\left(\Delta E_{\text{MODIS}}/\overline{E_{\text{ERA}}}\right), \quad (4)$$

где $\overline{E_{\text{ERA}}}$ и $\overline{P_{\text{ERA}}}(x, y)$ – средняя для анализируемого района эвапотранспирация и среднее распределение в нем атмосферных осадков; ΔE_{MODIS} – изменение средней эвапотранспирации в анализируемом районе в результате мелиорации; R_{ERA} – индекс рециркуляции осадков. Нижние индексы “ERA” и “MODIS” у множителей в формуле (4) указывают на источник данных, используемых для их вычисления.

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА БЕЛАРУСИ В РЕЗУЛЬТАТЕ МЕЛИОРАЦИИ

Рассмотрим два типа мелиорации, которые потенциально осуществимы для территории Беларуси (разумеется, не в тех масштабах, о которых идет речь ниже):

- 1) заболачивание пахотных земель (преобразование подстилающей поверхности класса “Crop-land” в класс “Herbaceous wetland” согласно классификации GLC2019);
- 2) облесение пахотных земель (преобразование подстилающей поверхности класса “Crop-land” в класс “Deciduous Broadleaf Forest”).

Для начала, исходя из данных спутникового прибора MODIS, рассмотрим изменения физических параметров подстилающей поверхности в результате изменения землепользования.

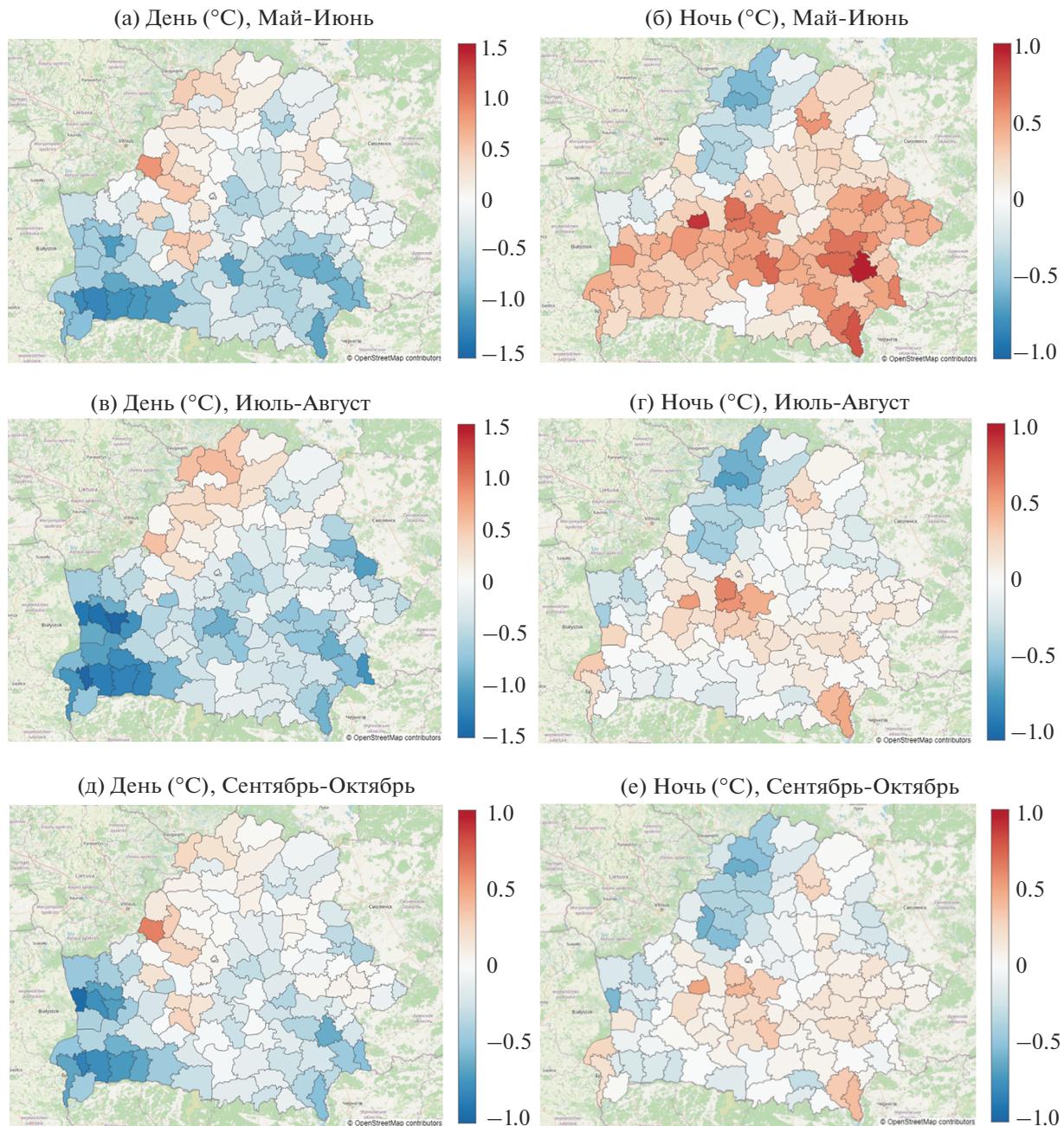


Рис. 1. Оценки изменений дневной (а, в, д) и ночной (б, г, е) температуры подстилающей поверхности в результате заболачивания пахотных земель, полученные по данным MODIS для трех частей вегетационного периода по административным районам Беларуси: (а, б) – май–июнь, (в, г) – июль–август, (д, е) – сентябрь–октябрь.

Оценки средних для административных районов Беларуси изменений дневной и ночной температур подстилающей поверхности при первом типе мелиорации (заболачивание пахотных земель) приведены на рис. 1. Из представленных результатов видно, что максимальный охлаждающий эффект от заболачивания земель для дневного времени суток составляет около 1.5°C и проявляется главным образом в южной части страны с макси-

мальными значениями на юго-западе. Охлаждающий эффект заболоченных земель в южной части страны объясняется их более высокой эвапостранспирацией по сравнению с землями сельскохозяйственного назначения.

В северной части Беларуси заболачивание земель неоднозначно сказывается на температуре подстилающей поверхности. На северо-западе Беларуси заболачивание земель сопровождается

преимущественно повышением дневной температуры, что, вероятно, связано с более высоким альбедо заболоченных земель по сравнению с землями сельскохозяйственного назначения [Шебеко, 1977; Обуховский, 2008]. На северо-востоке Беларуси процессы заболачивания могут сопровождаться как повышением, так и понижением дневной температуры подстилающей поверхности, причем эти эффекты не коррелируют с площадью заболачиваемых земель в административных районах, а связаны исключительно с почвенно-климатическими особенностями заболачиваемого района. В целом изменение температуры подстилающей поверхности в результате заболачивания земель на севере Беларуси проявляется значительно слабее, чем на юге (от -0.5 до $+0.5^{\circ}\text{C}$).

Для ночного времени суток температурные эффекты заболачивания пахотных земель в целом противоположны тем, что наблюдаются в дневное время, однако, имеется несколько принципиальных отличий. Во-первых, территория Беларуси по знаку изменения ночной температуры подстилающей поверхности разделяется не на северную и южную зоны, как это имеет место для изменения дневной температуры, а на северо-западную (понижение температуры) и юго-восточную (повышение температуры). Во-вторых, отчетливый прогревающий эффект переувлажненных земель в ночное время суток проявляется на юго-востоке Беларуси только в мае и июне. В самые теплые месяцы года (июль и август) на большей части Брестской области и на значительной части Гомельской области Беларуси температурный эффект заболачивания для ночного времени суток оказывается отрицательным.

Различие знаков температурного эффекта заболачивания для различных месяцев связано с различным влиянием влажности почвы на ночную температуру в условиях теплых и холодных ночей. В весенне-осенние месяцы, а также в начале лета ночные температуры нередко опускаются до близких к нулю значений. В этом случае переувлажненные почвы в силу их большей теплоемкости выхолаживаются гораздо медленнее, чем почвы с умеренным содержанием влаги, в результате чего достигается прогревающий эффект заболачивания. В теплые ночи, которые в Беларуси чаще всего отмечаются в июле и августе, переувлажненные почвы также по причине их более высокой теплоемкости оказываются, как правило, холоднее почв со средним содержанием влаги, поскольку медленнее прогреваются днем, и поэтому заболачивание в этом случае приводит к понижению ночной температуры.

На северо-западе Беларуси, где в теплый период года отмечаются наименьшие температуры как

в дневное, так и в ночное время суток, температурный эффект заболачивания, вероятно, связан с изменением альбедо подстилающей поверхности: днем переувлажненные почвы, имеющие малое альбедо, достаточно хорошо поглощают солнечную радиацию и лучше прогреваются, а ночью, наоборот – интенсивно испускают тепловое излучение и быстро выхолаживаются.

Проанализируем теперь изменения фактического и потенциального испарений в результате заболачивания пахотных земель в административных районах Беларуси. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 2.

Сразу следует заметить, что влияние заболачивания на эвапотранспирацию сравнительно невелико: максимум – 10–15 мм для каждого месяца. Это связано с тем, что вклад в эвапотранспирацию вносит не только испарение, но и транспирация растительного покрова, которая для многих растительных сообществ может даже превышать испарение с почвы [Шебеко, 1977]. В связи с этим в северных районах Беларуси (Витебская область), в которых почвы обеспечены достаточным количеством влаги, заболачивание и, соответственно, уменьшение площади растительного покрова приводят к снижению эвапотранспирации во все месяцы теплого периода года. В южных районах страны потенциальное испарение в современный период превалирует над осадками [Лысенко, Буяков, 2020], поэтому величина эвапотранспирации здесь главным образом определяется доступностью почвенной влаги, что и объясняет ее рост в результате заболачивания земель. Однако это справедливо не для всех южных районов Беларуси. Так, например, в некоторых районах Брестской области сведение растительного покрова и заболачивание может приводить и к уменьшению эвапотранспирации. Весной, когда почвы в среднем неплохо обеспечены влагой, заболачивание земель практически на всей территории Беларуси сопровождается уменьшением эвапотранспирации.

Оценки изменений температуры подстилающей поверхности и эвапотранспирации в результате увеличения лесистости (облесения пахотных земель) в районах Беларуси приведены на рис. 3. Видно, что в процессе облесения происходит значительное понижение средней дневной температуры подстилающей поверхности (в пределах 2°C) во всех административных районах Беларуси и практически столь же согласованное повышение ночной температуры (в пределах 0.4°C). Таким образом, климат Беларуси в результате облесения становится более мягким, с меньшими температурными суточными амплитудами.

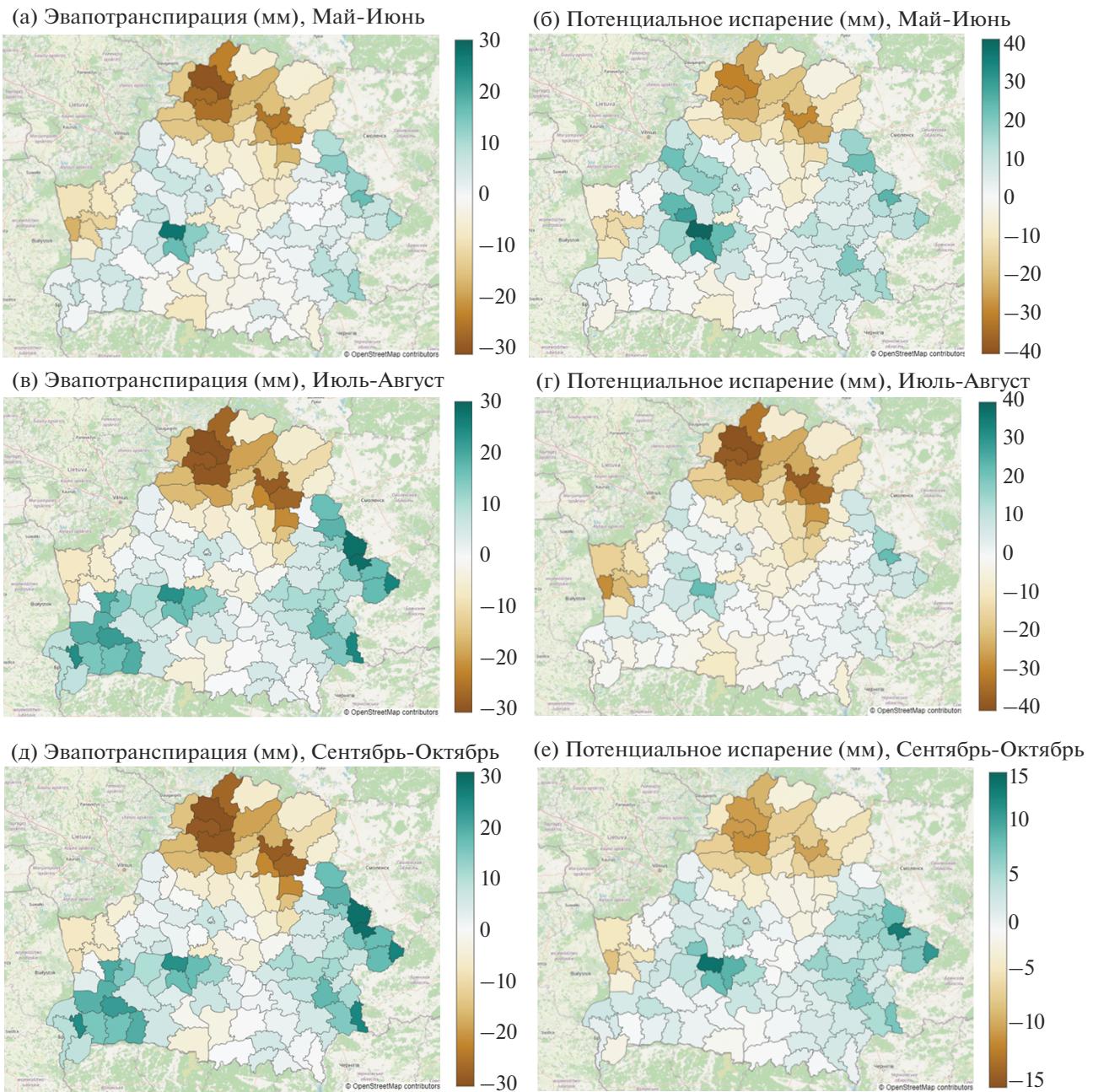


Рис. 2. Оценки изменений фактической (а, в, д) и потенциальной (б, г, е) эвапотранспирации в результате заболачивания пахотных земель, полученные по данным MODIS для трех частей вегетационного периода по административным районам Беларуси: (а, б) – май–июнь, (в, г) – июль–август, (д, е) – сентябрь–октябрь.

Средняя величина эвапостранспирации в результате облесения повышается во всех административных районах Беларуси, причем на достаточно ощутимую величину – до 100 мм, что на порядок превышает ее рост в результате заболачивания. При этом потенциальное (максимально возможное) испарение за счет охлаждающего эффекта заболачивания в среднем остается на прежнем уровне, а во многих районах даже понижается, что способ-

ствует повышению увлажнения земель при неизменном количестве атмосферных осадков.

Оценим теперь, как вышеотмеченные изменения физических характеристик подстилающей поверхности могут повлиять на температуру воздуха и количество атмосферных осадков. Для этого рассмотрим результаты численного моделирования погоды на территории Беларуси в период с 1 мая 2015 года по 30 октября 2015 г., который стал

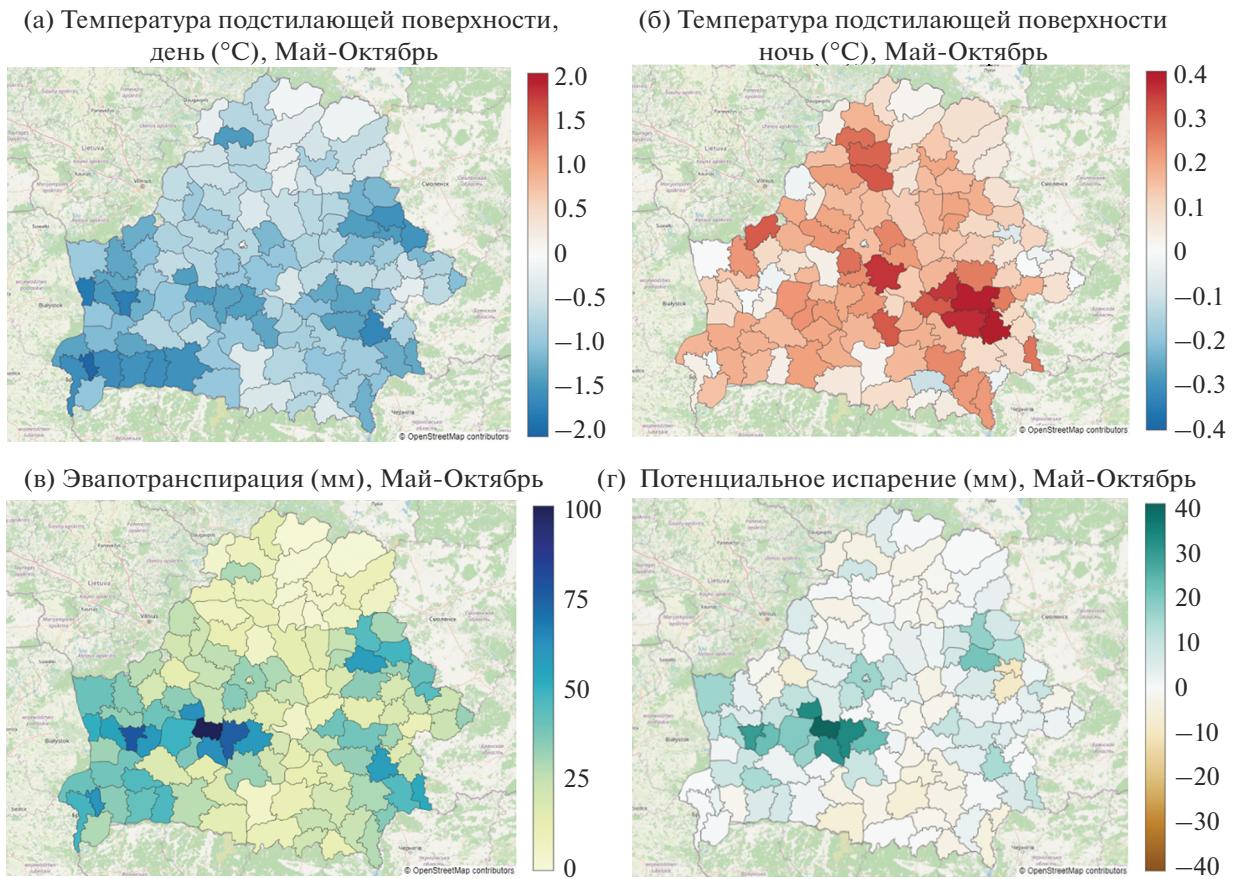


Рис. 3. Оценки изменений дневной (а) и ночной (б) температур подстилающей поверхности, фактической (в) и потенциальной (г) эвапотранспирации, полученные по данным MODIS для сценария облесения пахотных земель, по административным районам Беларусь.

одним из самых засушливых в истории метеонаблюдений [Логинов, 2020].

Метеорологические поля рассчитывались на основе мезомасштабной модели WRF при исходном состоянии подстилающей поверхности в модельном регионе (условия до мелиорации) и при замене в нем пахотных земель на широколиственные леса или переувлажненные земли (условия после мелиорации). Климатические последствия мелиорации оценивались по разности средних за рассматриваемый период метеорологических полей, рассчитанных при исходной и преобразованной подстилающей поверхности. В качестве модельного региона с изменяемой подстилающей поверхностью выбран регион Белорусского Полесья. Поля метеорологических величин моделировались для области с координатами $48\text{--}56^{\circ}$ с.ш., $21\text{--}35^{\circ}$ в.д. Результаты моделирования для приземной температуры воздуха, суммы атмосферных осадков и вертикальных турбулентных потоков тепла приведены на рис. 4 и 5.

В обоих рассматриваемых сценариях мелиорации отмечается понижение средней температуры

воздуха на мелиорируемой территории. Однако это понижение сравнительно не велико: для дневных температур (не представлены на рис. 4) – до 0.4°C , для среднесуточных (рис. 4а и 4б) – до 0.3°C . Эти оценки температурного эффекта мелиорации достаточно хорошо согласуются с расчетами на основе спутниковых данных, согласно которым процессы заболачивания и облесения в регионе Белорусского Полесья сопровождаются понижением дневной температуры подстилающей поверхности на $0.5\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$ и увеличением ночной температуры – на $0.1\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$.

Понижение температуры в результате облесения и заболачивания земель достигается главным образом за счет увеличения вертикального турбулентного потока скрытого тепла с подстилающей поверхности (рис. 5в, 5г). Наиболее отчетливое его увеличение – на $1.0\text{--}1.5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ наблюдается в численном эксперименте с облесением земель. Эти оценки примерно в полтора раза ниже тех, что получены по данным дистанционного зондирования Земли (увеличение испарения в Полесье на 3–5 мм/месяц, что эквивалентно потоку скры-

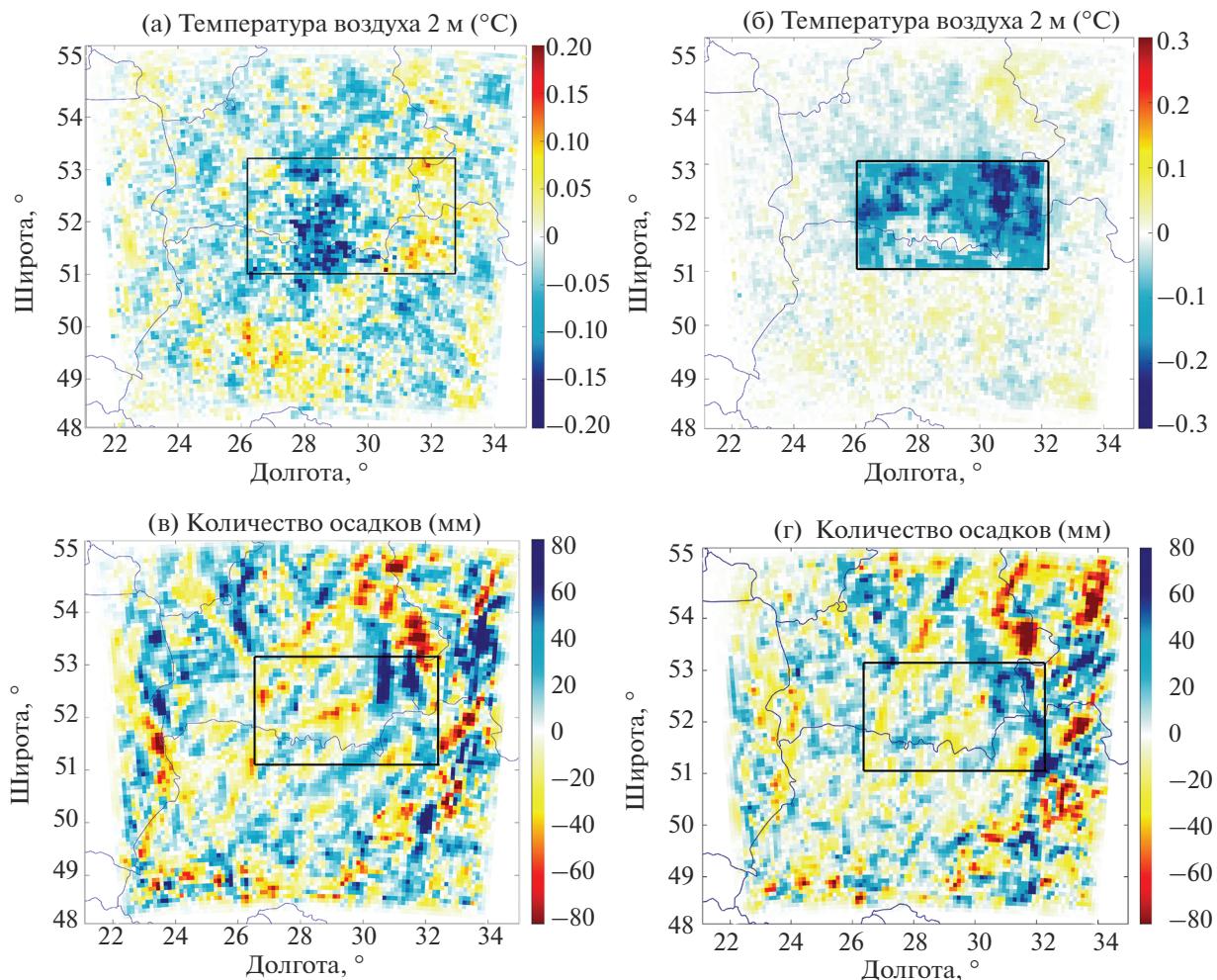


Рис. 4. Изменения средней температуры воздуха на высоте 2 м (а, б) и суммы атмосферных осадков (в, г), рассчитанные для вегетационного периода 2015 года на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): (а, в) – заболачивание пахотных земель, (б, г) – облесение пахотных земель.

того тепла 1.5–2.5 Вт/м²), однако, учитывая, различие периодов, для которых они получены, и исходных данных для моделирования изменений землепользования, это расхождение представляется вполне допустимым.

За счет увеличения испарения с подстилающей поверхности в численных экспериментах также отмечается увеличение массовой доли водяного пара в приземном слое атмосферы, что в совокупности с понижением приземной температуры может приводить к увеличению количества радиационных туманов на мелиорируемой территории.

В результате охлаждения подстилающей поверхности вертикальный турбулентный поток явного тепла уменьшается на 1–2 Вт/м² (рис. 5а, 5б). Уменьшение теплового потока, очевидно, препятствует развитию турбулентной конвекции и,

как следствие, образованию кучевых и слоисто-кучевых облаков. В результате количество атмосферных осадков на мелиорируемых территориях остается примерно на том же уровне, что и до мелиорации, что подтверждают результаты моделирования, представленные на рис. 4в и 4г.

Мезомасштабное метеорологическое моделирование также показывает отсутствие значимых изменений общей и конвективной облачности в рассматриваемом регионе. Это говорит о том, что преобразование подстилающей поверхности в регионе Белорусского Полесья не вызывает заметных изменений характеристик конвекции в пограничном слое атмосферы. Таким образом, можно сделать вывод, что конвективные движения в рассматриваемом регионе главным образом стимулируются крупномасштабными восходящими движениями и притоком влаги в результате ее горизонтальной адвекции.

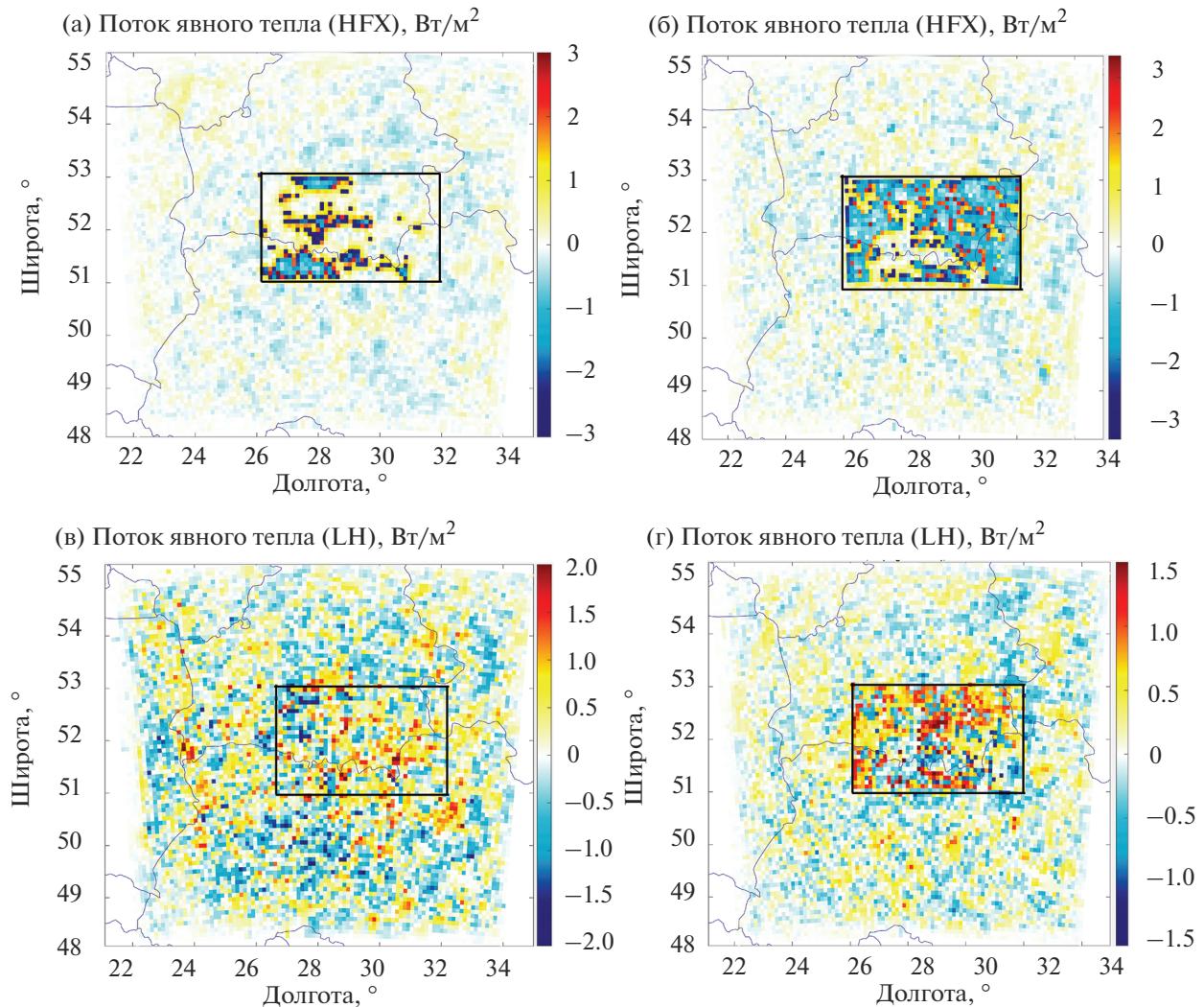


Рис. 5. Изменения среднего потока явного тепла HFX (а, б) и потока скрытого тепла LH (в, г), рассчитанные для вегетационного периода 2015 года на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): (а, в) – заболачивание пахотных земель, (б, г) – облесение пахотных земель.

Для оценки влияния на атмосферные осадки притока влаги в результате ее испарения с земной поверхности использовался вышеописанный метод расчета рециркуляции осадков. На первом этапе на основе уравнений (2) и реанализа ERA5 рассчитывался вклад испарения на мелиорируемой территории в пространственное распределение атмосферных осадков. Далее, на основании данных спутниковых изменений и приведенных выше оценок изменений эвапотранспирации в районах Беларусь при различных сценариях мелиорации, рассчитывался вклад каждого района в сумму атмосферных осадков и их кумулятивный вклад в распределение осадков на исследуемой территории. Результаты вычислений осреднялись за период 1991–2020 гг., рекомендуемый Всемирной Метеорологической Организацией для вычисления климатических норм.

Относительное изменение поля атмосферных осадков, рассчитанное для сценария облесения пахотных земель, представлено на рис. 6. Нужно отметить, что данному сценарию соответствуют наибольшее увеличение эвапотранспирации в мелиорируемом регионе, поэтому он во многом является показательным в части влияния мелиорации на атмосферные осадки. Летний период года, взятый для демонстрации этого влияния, также является показательным, поскольку для него в наибольшей степени проявляется влияние мезомасштабной конвекции на процессы формирования облаков и осадков.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что влияние мелиорации на атмосферные осадки сравнительно невелико – меньше 2% от нормы, что подтверждает выводы, сделанные на основании мезомасштабного моделирования. За

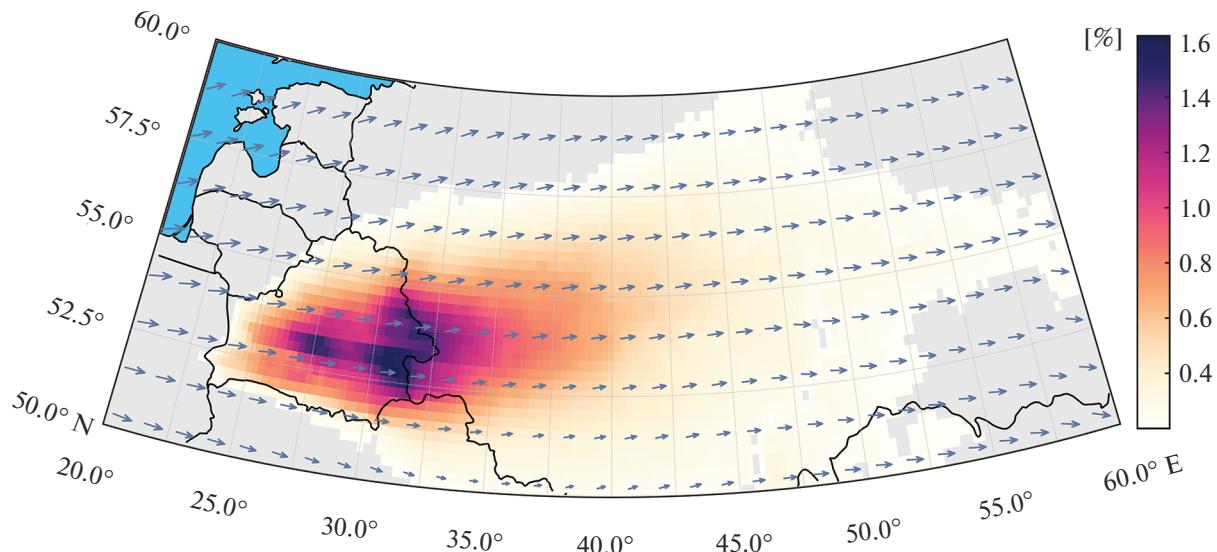


Рис. 6. Процент от нормы осадков, обусловленный увеличением эвапотранспирации на территории Беларуси в результате заболачивания пахотных земель.

счет западного переноса пространственное распределение осадков, сформированных в результате местного испарения, вытянуто на восток и простирается далеко за пределы мелиорируемого региона. Для ближайших к Беларуси территорий Российской Федерации количество осадков в рассматриваемых сценариях мелиорации может измениться не более чем на 1% от нормы.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные ранее исследования взаимосвязей изменений землепользования и климата, показывают, что увеличение площади растительного покрова в теплых аридных районах способствует снижению средней температуры за счет эвапотранспирации, а в холодных boreальных районах приводит к дополнительному росту температуры за счет альбедных связей [Duvieiller et al., 2018; Forzieri et al., 2017; Lawrence et al., 2022]. Территория Беларуси по своим климатическим ресурсам занимает промежуточное положение между этими районами, поэтому обратные атмосферно-экосистемные связи здесь принимают наиболее сложные формы, что и подтверждают представленные выше результаты.

Основные особенности влияния изменения землепользования на климат Беларуси состоят в следующем.

1. Температурный эффект заболачивания неоднозначен не только по величине, но и даже по знаку, причем он совершенно не коррелирует с

площадью заболачиваемых земель, а определяется главным образом почвенно-климатическими условиями заболачиваемой местности. Максимально возможное изменение температуры подстилающей поверхности в результате заболачивания составляет -1.5°C для дневного времени суток и $+0.6^{\circ}\text{C}$ – для ночных.

2. В южной части Беларуси (ниже широты Минска) заболачивание в среднем приводит к понижению дневной температуры в результате повышения испарения, а на севере – способствует повышению дневных температур за счет альбедных связей.

Вочные часы заболачивание может обуславливать как повышение, так и понижение температур. В южных регионах Беларуси с песчаными почвами заболачивание в холодные дни будет замедлять выхолаживание подстилающей поверхности (за счет большей теплоемкости переувлажненных почв), а в теплые – способствовать ее охлаждению (за счет меньшего нагрева в дневные часы).

В регионах Беларуси, в которых регулирование температуры подстилающей поверхности в теплый период года происходит в большей степени за счет альбедных связей (северо-запад страны), заболачивание будет сопровождаться ростом дневных температур (за счет большего поглощения солнечного излучения) и понижением ночных (за счет большей излучательной способности переувлажненных почв).

3. Суммарное испарение (эвапотранспирация) в северных районах Беларуси, характеризующих-

ся достаточно высокой увлажненностью почв (преимущественно в Витебской области), в результате заболачивания уменьшается, что связано с уменьшением транспирации растительного покрова. В остальной части Беларуси эвапотранспирация в среднем повысится, однако величина ее изменения будет существенно зависеть от типа растительности, уровня грунтовых вод и средних почвенно-климатических условий на заболоченных землях.

4. Наибольший климатический эффект мелиорации достигается в результате облесения территории. В этом случае происходит значительное понижение дневных (в пределах 2°C) и повышение ночных температур подстилающей поверхности (в пределах 0.4°C), причем практически на всей мелиорируемой территории, что делает климат более умеренным. Эвапотранспирация в вегетационный период в результате облесения повышается во всех районах Беларуси, причем на достаточно ощутимую величину – до 100 мм. При этом потенциальное (максимально возможное) испарение остается на прежнем уровне или даже понижается, что способствует увеличению увлажненности почв при неизменном количестве атмосферных осадков.

5. Изменения физических характеристик подстилающей поверхности (альbedo, шероховатости, эвапотранспирации и др.) оказывают заметное влияние на температуру воздуха на мелиорируемой территории. Мезомасштабное моделирование показывает, что в результате заболачивания и облесения пахотных земель в регионе Белорусского Полесья приземная температура воздуха в вегетационный период понижается на 0.2–0.4°C, как в дневные, так и вочные часы. Влияние же мелиорации на атмосферные осадки можно оценить величиной, не превышающей 2%. При этом для территории Беларуси пространственное распределение осадков, образующихся за счет местного испарения, будет вытянуто в направлении западного переноса, а максимум его смешен на восток по отношению к району мелиорации.

Столт также отметить, что влияние землепользования на климат не ограничивается лишь механизмами, связанными с альбедо, эвапотранспирацией и шероховатостью подстилающей поверхности. Имеет место и ряд других косвенных воздействий землепользования на климат. Среди них наиболее важными являются изменения регионального углеродного цикла. В целом как заболачивание, так и облесение должны способствовать уменьшению нетто-эмиссии CO₂. В первом случае это достигается за счет замедления минерализации органического вещества и предотвращения торфяных пожаров, во втором – за счет накопления

органического вещества в биомассе растений и почве.

В Беларуси ежегодная эмиссия CO₂ с осушенных и неиспользуемых выработанных торфяных месторождений составляет 21.3–23.6 т/га в год, а при сельскохозяйственном использовании торфяников – 1.5–20.9 т/га (в зависимости от возделываемых культур) [Бамбалов, 2005]. На общей площади осущеных в Беларуси торфяников около 1530 тыс. га ежегодно выделяется около 16.7 млн тонн CO₂, в то время как болотные экосистемы, напротив, ежегодно выводят из атмосферы около 0.9 млн тонн CO₂. Эта величина на три порядка уступает нетто-стоку CO₂ в лесные экосистемы Беларуси, который согласно кадастровым данным и расчетам по данным дистанционного зондирования Земли, составляет примерно 30 млн т/год [Лысенко, Логинов и др., 2021].

Совершенно очевидно, что на практике, даже при самых решительных мерах борьбы с изменением климата, речь может идти об увеличении стока CO₂ в природные экосистемы Беларуси лишь на 10–15%, т. е. примерно на 5–7 млн т/год. При общемировых выбросах CO₂ около 37 млрд т/год эта величина вряд ли способна заметным образом повлиять на парниковый эффект и скорость глобального потепления.

Другой аспект влияния природных экосистем на климат связан с выделением ими в атмосферу большого количества высокомолекулярных летучих органических соединений, из которых в результате фотохимических реакций образуются вторичные биогенные аэрозоли [Tunved et al., 2008]. Последние принимают участие в образовании облаков и оказывают влияние на их микрометеорологические параметры, что на мезомасштабном уровне проявляется в изменении альбедо и радиационного баланса на верхней границе атмосферы. В настоящее время существует значительная неопределенность в оценках этого влияния [Shrivastava et al., 2017; Scott et al., 2018; Yli-Juuti et al., 2021], однако, совершенно ясно, что величина радиационного форсинга биогенных аэрозолей не превышает 0.1 Вт/м².

Гораздо более значимым фактором влияния мелиорации на климат является изменение поверхностного стока и уровня грунтовых вод. По имеющимся данным [Львович, 1963; Молчанов, 1960], в безлесной местности 60–80% выпавших осадков стекает по поверхности; в лесостепи с лесистостью 20% количество стекающих осадков сокращается до 25%, а в лесной местности с лесистостью 60–80% только 7% осадков уходит в поверхностный сток. С уменьшением поверхностного стока осадков одновременно замедляется

снос водой органических и минеральных частиц почвы, что предотвращает процесс водной эрозии почв. Оптимальный гидрологический режим местности, обеспечивающий наилучшее питание грунтовых вод, достигается при лесистости 50–60% [Молчанов, 1960].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе оценки климатических последствий мелиорации на территории Беларуси дают достаточно полное представление о возможностях антропогенного регулирования климата на региональном уровне и о целесообразности реализации тех или иных мер в части смягчения негативных последствий его изменений. Климатический эффект мелиорации достигается главным образом за счет изменений альбедо, эвапотранспирации и шероховатости подстилающей поверхности, которые в совокупности влияют на радиационный и тепловой балансы подстилающей поверхности, конвективные процессы в планетарном пограничном слое атмосферы, облачность и осадки.

Лесонасаждение и повторное заболачивание выработанных торфяников, предусматриваемые в Национальных планах и стратегиях адаптации к изменению климата, помимо очевидного предотвращения процессов деградации земель, способны оказать ряд положительных эффектов на микроклимат, гидрологический и углеродный балансы. Так, в наиболее уязвимых перед изменением климата южных районах Беларуси рекультивация земель повлечет изменение целого ряда метеорологических показателей: в теплый период года суммарное испарение возрастет на 3–5 мм/месяц, что соответствует увеличению потока скрытого тепла с подстилающей поверхности на 1–2 Вт/м²; поток явного тепла с подстилающей поверхности уменьшится на 1–3 Вт/м², а средняя температура воздуха понизится в пределах 0,5°C; количество атмосферных осадков увеличится в среднем на 1–2%. За счет экологической реабилитации земель также возможно на несколько миллионов тонн повысить экосистемный нетто-сток CO₂, что будет важным шагом на пути выполнения Республикой Беларусь обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бамбалов Н.Н., Ракович В.А. Роль болот в биосфере. Минск: Издательский дом “Белорусская книга”, 2005. 288 с.

Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние учета радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI–XXI веков // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. Т. 47. № 1. С. 18–34.

Костин С.И., Покровская Т.В. Климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 235 с.

Лихацевич А.П., Meerovskiy A.C., Vakhonin N.K. Мелиорация земель в Беларуси. Минск: БелНИИМиЛ, 2001. 308 с.

Логинов В.Ф. Изменения климата Беларуси и их последствия / В.Ф. Логинов и др. // Минск: Тонпик, 2003. 330 с.

Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск: УП “Энциклопедикс”, 2020. 264 с.

Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Хомич В.С., Семенченко В.П., Кулак А.В., Степанович И.М. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 515–527.

Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77–88.

Лысенко С.А., Буяков И.В. Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 3. С. 22–41.

Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Бондаренко Ю.А. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах Беларуси // Природопользование. 2020. № 1. С. 20–29.

Лысенко С.А., Зайко П.О. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4(382). С. 50–68.

Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Бондаренко Ю.А. Баланс углерода в наземных экосистемах Беларуси и его устойчивость к изменению климата // Природопользование. 2021. № 1. С. 5–15.

Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Зайко П.О. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 47. № 1. С. 59–71.

Львович М.И. Человек и воды: преобразование водного баланса и речного стока. М.: Географиз, 1963. 567 с.

Молчанов А.А. Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР, 1960. 487 с.

Обуховский Ю.М. Ландшафтная индикация: учебное пособие для студентов высших учебных заведений по географическим специальностям / ред. А.В. Матвеев, В.Н. Киселев. Минск: БГУ, 2008. 255 с.

Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С. Оценка влияния изменения лесистости

- центрального региона Восточно-Европейской равнинны на летние погодные условия // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 4. С. 79–101.
- Рахманов В.В.* Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
- Шебеко В.Ф.* Изменение микроклимата под влиянием мелиорации болот. М.: Наука и техника, 1977. 286 с.
- Шебеко В.Ф.* Влияние осушительных мероприятий на водный режим территорий. Минск: Ураджай, 1983. 200 с.
- Широков В.М., Лопух П.С.* Изменение микроклимата побережий и акваторий водохранилищ в пригородных зонах Беларуси // Климатические ресурсы Беларуси и их рациональное использование. Минск: Университетское, 1986. С. 88–93.
- Федоров С.Ф.* Исследование элементов водного баланса в лесной зоне европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 264 с.
- Федоров С.Ф.* Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 20–31.
- Brubaker K., Entekhabi D., Eagleson P.S.* Estimation of Continental Precipitation Recycling // J. Clim. 1993. V. 6. № 6. P. 1077–1089.
- Duveiller G., Hooker J., Cescatti A.* The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance // Nat. Commun. 2018. V. 9. № 679.
- Eltahir E.A.B., Bras R.L.* Precipitation recycling in the Amazon basin // Q. J. R. Metheorol. Soc. 1994. V. 120. № 518. P. 861–880.
- Forzieri G., Alkama R., Miralles D.G., Cescatti A.* Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth // Science. 2017. V. 356. № 6343. P. 1180–1184.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geo-spatial analysis for everyone // Rem. Sens. Environ. 2017. V. 2. № 1. P. 18–27.
- Guo L., Klingaman N.P., Demory M.E., Vidale P.L., Turner A.G., Stephan C.C.* The contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East Asian precipitation and its variability // Climate Dynamics. 2018. V. 51. № 1–2. P. 4139–4156.
- Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q.* Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model // Physics and Chemistry of the Earth. 2018. V. 103. P. 115–126.
- Lawrence D., Coe M., Walker W., Verchot L., Vandecar K.* The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate // Front. For. Glob. Change. 2022. V. 5.
- Li R., Wang C., Wu D.* Changes in precipitation recycling over arid regions in Northern Hemisphere // Theor. Appl. Climatol. 2018. V. 131. P. 489–502.
- https://lpdaac.usgs.gov/documents/118/MOD11_User_Guide_V6.pdf
- https://lpdaac.usgs.gov/documents/494/MOD16_User_Guide_V6.pdf
- <https://land.copernicus.eu/global/products/lc>
- Shrivastava M., Cappa C.D., Fan J., Goldstein A.H. et al.* Recent advances in understanding secondary organic aerosol: Implications for global climate forcing // Rev. Geophys. 2017. V. 55. № 2. P. 509–559.
- Scott C.E., Arnold S.R., Monks S.A. et al.* Substantial large-scale feedbacks between natural aerosols and climate // Nature Geosci. 2018. V. 11. № 1. P. 44–48.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D., Huang X.* A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 // NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021. 165 p.
- Tunved P., Stroöm J., Kulmala M., Kerminen V.-M., Dal Maso M., Svennsson B., Lunder C., Hansson H.-C.* The natural aerosol over Northern Europe and its relation to anthropogenic emissions—implications of important climate feedbacks // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2008. V. 60. № 4. P. 473–484.
- Yli-Juuti T., Mielonen T., Heikkilä L. et al.* Significance of the organic aerosol driven climate feedback in the boreal area // Nat. Commun. 2021. V. 12. № 5637.

Potential Climate Impacts of Reforestation and Waterlogging in Belarus

S. A. Lysenko¹, * and P. A. Zaiko¹

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Science of Belarus,
10, F. Skoriny str., Minsk, 220076 Republic of Belarus

*e-mail: lysenko.nature@gmail.com

The article discusses the expected climate changes in Belarus as a result of two types of land transformation – re-wetting degraded peatlands and increasing forest cover. The analysis was performed for the growing season (May–September) based on long-term Earth remote sensing data, mesoscale modeling of atmospheric processes, and balance calculations using ERA5 reanalysis. It is shown that as a result of waterlogging, the daytime temperature of the underlying surface for the southern part of Belarus (below the latitude of Minsk) decreases within 1.5°C due to increased consumption, and for the northern part – within 0.5°C due to albedo regularity. At night, waterlogging, depending on the soil and climatic conditions, can cause both an increase and a specific value of the underlying surface temperature within 1°C. Evapotranspiration due to waterlogging in the northern regions of Belarus, and in the southern regions – emissions, which is associated with a signif-

icant ratio between consumption and transpiration in these regions. During the reforestation of cropland, the daytime land surface temperature of Belarus territory decreases within 2°C, and at night – within 0.4°C. The total evapotranspiration for the growing season due to the increase in forest cover reaches 100 mm, and approaching (maximum possible) consumption remains at the same level, which overestimates soil absorption at an increased amount of atmospheric pressure. The above changes in the physical characteristics of the underlying surface as a result of reclamation determine the standard surface air temperature in the reclaimed disease within 0.4°C and an increase in the sums of atmospheric conditions within 2% of the climatic norm. At the same time, secondary reactions are predominantly distributed in morbidity due to western transfer with an emphasis on the eastern border distribution to the reclaimed region.

Keywords: climate change, land reclamation, waterlogging, reforestation, evapotranspiration, mesoscale modeling, climate recirculation