

МЕЗОМАСШТАБНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ОБЛЕСЕНИИ И ПОВТОРНОМ ЗАБОЛАЧИВАНИИ ЗЕМЕЛЬ: СРАВНЕНИЕ С ОЦЕНКАМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Лысенко, П. О. Зайко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе мезомасштабной численной модели WRF (Weather Research and Forecasting), модели атмосферного водного баланса и данных дистанционного зондирования Земли проведены численные эксперименты по оценке потенциальных изменений климата в Гомельском Полесье в теплый период года (апрель – сентябрь) при повторном заболачивании и облесении земель в данном регионе: рассчитаны изменения температуры, количества осадков, потоков явного и скрытого тепла в дневное и ночное время.

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.

Численными экспериментами показано, что при заболачивании земель произойдет общее понижение температуры воздуха в регионе на 0,2–0,3 °С. Максимальное изменение потока скрытого тепла составит около +0,66 Вт/м², что соответствует увеличению месячного испарения на 6,1 мм. Перепады температуры на протяжении суток уменьшились в среднем на 0,8 °С. Увеличение испарения с подстилающей поверхности приведет к росту массовой доли водяного пара как в Гомельском Полесье, так на всей территории Беларуси. В среднем для летнего периода рост удельной влажности воздуха на высоте 2 м составил 4,5 %. Влияние обводнения территории Гомельского Полесья на атмосферные осадки неоднозначно: максимальное увеличение осадков для теплого сезона 2010 г. наблюдалось для июня – июля и составило около 2,7 % от нормы.

Эффект увеличения лесистости в численных экспериментах проявится в понижении среднесуточной температуры воздуха на 0,3–0,4 °С (максимально – на востоке Гомельской области), уменьшении амплитуды суточного цикла температуры на 0,9–1,4 °С и максимальном увеличении среднемесячного испарения в вегетационный период на 14 мм.

Ключевые слова: испарение; аридность; обводнение территории; численное моделирование; дистанционное зондирование Земли.

Для цитирования. Лысенко С. А., Зайко П. О. Мезомасштабное гидродинамическое моделирование климата Гомельской области при облесении и повторном заболачивании земель: сравнение с оценками на основе данных дистанционного зондирования Земли // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 18–29.

MESOSCALE HYDRODYNAMIC CLIMATE MODELLING IN GOMEL REGION UNDER REFORESTATION AND RE-SWAMPING SCENARIOS: COMPARISON WITH ESTIMATIONS BASED ON REMOTE SENSING DATA

S. A. Lysenko, P. O. Zaiko

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Numerical experiments based on the mesoscale WRF (Weather Research and Forecasting) model, atmospheric water balance model and Earth remote sensing data, have been carried out to assess potential climate changes in Gomel Polesie in the warm period of the year (April – September) under the scenarios of re-swamping and reforestation of lands in this region: changes in temperature, precipitation, the fluxes of apparent and latent heat during daytime and nighttime have been calculated.

The climatic effect of melioration is achieved mainly due to changes in albedo, evapotranspiration and underlying surface roughness, which together affect the radiation and heat balance of the underlying surface, convective processes in the planetary boundary layer of the atmosphere, cloudiness and precipitation.

Numerical experiments show that, as the result of re-swamping there would be a general decrease in air temperature in the region by 0.2–0.3 °С. The maximum change in latent heat flux was about +0.66 W/m², which means an increase in

monthly evaporation by 6.1 mm. Temperature variations throughout the day decreased by 0.8 °C on average. The increase in evaporation from the underlying surface leads to an increase in the mass fraction of water vapor not only in Gomel Polesie, but also over the whole territory of Belarus. On average for the summer period, the increase of specific humidity of air at 2 m was 4.5 %. The influence of watering of the territory of Gomel Polesie on atmospheric precipitation is ambiguous: the maximum increase in precipitation for the warm season of 2010 was observed for June – July and was about 2.7 % of the norm.

The effect of reforestation in numerical experiments was manifested in the decrease of average daily air temperature by 0.3–0.4 °C (the maximum was observed in the east of Homiel region), the amplitude decrease of daily temperature cycle by 0.9–1.4 °C and the maximum increase of average monthly evaporation during the growing season by 14 mm.

Keywords: evaporation; aridity; waterlogging; numerical modeling; remote sensing.

For citation. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Mesoscale hydrodynamic climate modelling in Gomel region under reforestation and re-swamping scenarios: comparison with estimations based on remote sensing data. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 18–29.

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 [1, 2]. Границы агроклиматических областей Беларуси, определяемые по годовой сумме активных среднесуточных температур выше 10 °C, продвигаются в северном направлении 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 [1]. В современный период потенциальное испарение превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей Беларуси. Среднее для Беларуси значение индекса аридности, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1980 по 2020 г. уменьшилось на 30 % и в современный период составляет примерно 0,8.

Наиболее уязвимым перед современным изменением климата является регион Белорусского Полесья, который в 1960–70-е годы подвергся осушительной мелиорации, приведшей впоследствии 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. [3, 4]. Усиление засушливости климата этого региона оказывает крайне негативное влияние на продуктивность большинства местных (аборигенных) видов растительности, не приспособленных к новым климатическим условиям [5]. Нехватка почвенной влаги особенно ощутимо сказывается на биологической продуктивности пахотных земель Белорусского Полесья и урожайности сельскохозяйственных культур, традиционно выращиваемых в этом регионе [2, 6, 7].

Принимая во внимание проблемы засух и деградации земель в Полесье, Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь совместно с Программой развития Организации Объединенных Наций и партнерами с 1999 г. ведутся проекты в области устойчивого управления водно-болотными угодьями и повторного заболачивания торфяников. С 2020 г. 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 [8]. 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 [9–12], в которых влияние переиспарения влаги на атмосферные осадки оценено 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 [13]. 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 [14], 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 [4].

Результаты моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на территории Восточно-Европейской равнины [15] показывают, что важную роль в формировании атмосферных осадков и температурного режима в теплый период года играет лесистость территории. При обезлесении модельной области (55°–59° 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 [16]. 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 [16–18], 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 осушенных земель. В своих выводах авторы исходили из многолетних данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), мезомасштабного моделирования атмосферных процессов и балансовых расчетов на основе реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Приведенные в работе 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 полученные 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.

Материалы и методы исследования. Предметом исследования являлись средние распределения по территории Беларуси температуры приземного 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).

Оценку изменений температуры подстилающей поверхности (LST) и амплитуды ее суточного хода, фактической (ET) и потенциальной (PET) эвапотранспирации проводили, основываясь на данных спутникового спектрорадиометра MODIS за 2000–2020 гг. Эту задачу решали эмпирическим методом, основанном на попиксельном анализе методом скользящего окна геопространственных продуктов MOD11A1 V6.1 (дневная и ночная температура подстилающей поверхности) и MOD16A2 V105 (8-дневная эвапотранспирация). На базе параметрических карт MODIS для исследуемого региона вычисляли средние значения параметров подстилающей поверхности в окрестности каждого пиксела при двух бинарных масках, задающих тип поверхности до и после мелиорации. Для этой цели использовали скользящее окно радиусом 30 км и схему классификации подстилающей поверхности Global Land Cover 2019 (GLC2019), основанную на данных спутниковых приборов Европейского Космического Агентства. Значения LST, ET и PET для каждого пиксела, относящегося к подстилающей поверхности до мелиорации, заменяли их средними значениями в окрестности этого пиксела для подстилающей поверхности после

мелиорации. Полученные путем такой замены карты изменений параметров подстилающей поверхности агрегировали по 118 административным районам Беларуси и осредняли за весь доступный ряд наблюдений (с 2000 по 2020 г.) с целью получения оценок климатического воздействия мелиорации.

Оценки изменений климатических параметров на мелиорируемой территории сравнивали с результатами численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на базе модели WRF 4.1 (Weather Research and Forecasting), применяемой в национальной гидрометеорологической службе Беларуси для краткосрочных прогнозов погоды.

В качестве модельного региона с изменяемой структурой землепользования нами был выбран регион Белорусского Полесья, который содержал наибольший процент мелиорированных земель (51°–53° с. ш., 26°–32° в. д.). Структуру землепользования в модельном регионе и во всем расчетном домене модели WRF (48°–56° с. ш., 21°–35° в. д.) классифицировали на основе данных GLC2019, которые лучше стандартных данных WRF отражают современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси и имеют более высокое пространственное разрешение – 100 м.

В нашем случае главным недостатком численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов на мелиорируемой территории является сложность оценок климатических изменений, поскольку они требуют чрезвычайно длительных вычислений, особенно если это касается оценок изменений атмосферных осадков, подверженных большой пространственной и временной изменчивости. В связи с этим для оценок влияния мелиорации на распределение атмосферных осадков использовали метод, основанный на квазистационарной модели баланса влаги в столбе атмосферного воздуха, справедливой при длительных периодах осреднения [16–19].

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 [16–18]:

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

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 кг/(м²·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 – Q_{in} . Искомой неизвестной в этих уравнениях будет доля общего количества осадков, обусловленная местным испарением R , которую в дальнейшем станем называть индексом рециркуляции осадков. 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 [16–18]. В этом случае индекс рециркуляции осадков легко рассчитывается по известным значениям суммарного испарения E и адвективного потока влаги Q_{in} :

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

Данный метод можно несколько модифицировать для получения пространственного распределения осадков, выпадающих в результате местного испарения [19]. 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 соответственно, 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 (2) 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 [2, 19]:

$$R_{ij}^v = \frac{(Q_{in}^r)_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y}{(Q_{in}^{tot})_{ij} + E_{ij}\Delta x\Delta y},$$

$$(Q_{in}^{tot})_{ij} = (F_{i,j-1/2}^{in} + F_{i,j+1/2}^{in})\Delta y + (G_{i-1/2,j}^{in} + G_{i+1/2,j}^{in})\Delta x, \quad (3)$$

$$(Q_{in}^r)_{ij} = (F_{i,j-1/2}^{in}R_{i,j-1}^{v-1} + F_{i,j+1/2}^{in}R_{i,j+1}^{v-1})\Delta y + (G_{i-1/2,j}^{in}R_{i-1,j}^{v-1} + G_{i+1/2,j}^{in}R_{i+1,j}^{v-1})\Delta x,$$

где $(Q_{in}^{tot})_{ij}$ и $(Q_{in}^r)_{ij}$ – средние скорости поступления общей (верхний индекс «tot») и рециркулирующей (верхний индекс «r») влаги в элементарную пространственную ячейку за счет ее адвекции из соседних ячеек; $F_{i,j\pm 1/2}^{in}$ и $G_{i,j\pm 1/2}^{in}$ – 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 $G_{i,j\pm 1}$; $v = 1, 2, \dots$ – 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 использовали 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, рассчитывали для каждого административного района Беларуси на основе итерационного решения системы уравнений (3). Трансформацию поля атмосферных осадков, вызванную мелиорацией в анализируемом районе, оценивали по формуле

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

где $\overline{E_{ERA}}$ и $\overline{P_{ERA}}(x, y)$ – 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.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим результаты численного моделирования средних за вегетационный период значений метеорологических параметров и их изменений в результате мелиорации. Метеорологические поля рассчитывали на основе мезомасштабной модели WRF при исходном состоянии подстилающей поверхности в модельном регионе (условия до мелиорации) и при замене в модели класса земель «пахотные земли» на классы «широколиственные леса» или «переувлажненные земли» (условия после мелиорации). Климатические последствия мелиорации оценивали по разности средних за рассматриваемый период метеорологических полей, рассчитанных при исходной и преобразованной структуре подстилающей поверхности. Результаты моделирования для приземной температуры воздуха приведены на рис. 1.

В обоих рассматриваемых сценариях мелиорации отмечается понижение средней температуры воздуха на мелиорируемой территории. Однако это понижение сравнительно невелико: для дневных температур – до 0,4 °C, для среднесуточных – до 0,3 °C.

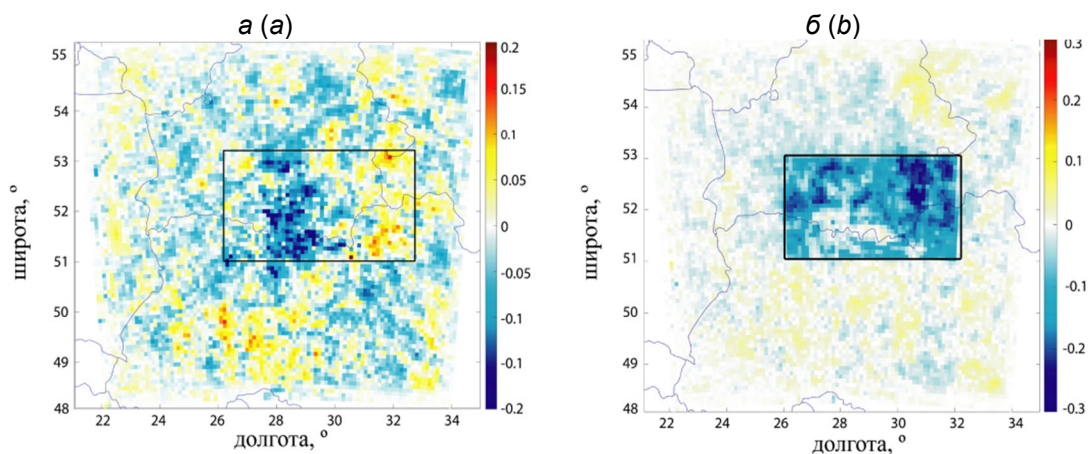


Рис. 1. Изменения средней температуры воздуха (°C) на высоте 2 м, рассчитанные для вегетационного периода 2015 г. на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): а – заболачивание; б – облесение

Fig. 1. Changes in average air temperature (°C) at 2 m altitude calculated for the growing season of 2015 using WRF model under two melioration scenarios in Belarusian Polesie region (highlighted by a box): a – re-swamping; b – reforestation

Максимальное понижение среднесуточной температуры воздуха при заболачивании земель на мезомасштабном уровне составляет около 0,2 °С, что согласуется с оценками на основе спутниковых данных (рис. 2). Оценки получены на основе данных спутникового прибора MODIS за 2000–2023 гг., осредненных за вегетационный период с марта по сентябрь.

В сценарии замены в модели класса земель «пахотные земли» (категория «Cultivated and managed vegetation / agriculture» в глобальной классификации земной поверхности GLC2019) на класс земель «травянистые водно-болотные угодья» (категория «Herbaceous wetland») максимальное уменьшение среднесуточной температуры подстилающей поверхности (LST) в административных районах Гомельской области составило 0,49 °С. Для пересчета этого значения в соответствующее изменение температуры воздуха на высоте 2 м (T_{2m}) необходимо рассмотреть связь между изменениями LST и T_{2m} . В связи с этим рассчитаны линейные тренды изменений средних за вегетационный период значений LST и T_{2m} для периода 2000–2023 гг. Карта отношения трендов LST и T_{2m} для территории Гомельской области представлена на рис. 3. Видно, что рост LST в данном регионе существенно опережает рост температуры воздуха. Это означает, что к парниковому потеплению в данном регионе добавляются другие факторы, ускоряющие рост LST. В первую очередь это связано с уменьшением влажности и теплоемкости почвы, что особенно заметно на землях сельскохозяйственного назначения, на которые приходится максимум отношения трендов LST и T_{2m} . Рост температуры таких земель происходит в 2–4 раза быстрее, чем рост температуры воздуха.

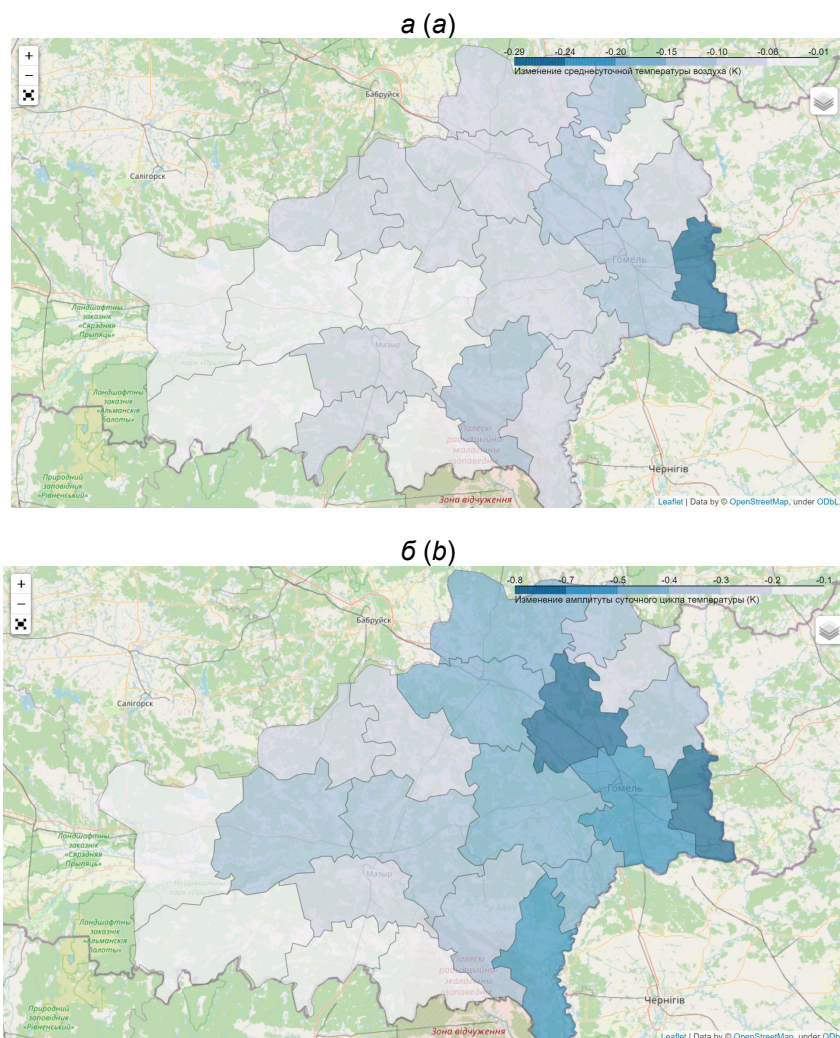


Рис. 2. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений среднесуточной температуры воздуха (а) и амплитуды суточного цикла температуры (б) в районах Гомельской области для сценария повторного заболачивания земель

Fig. 2. Estimations of changes in average daily temperature of Earth remote sensing data (a) and amplitude of diurnal temperature cycle (b) under the re-swamping scenario in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

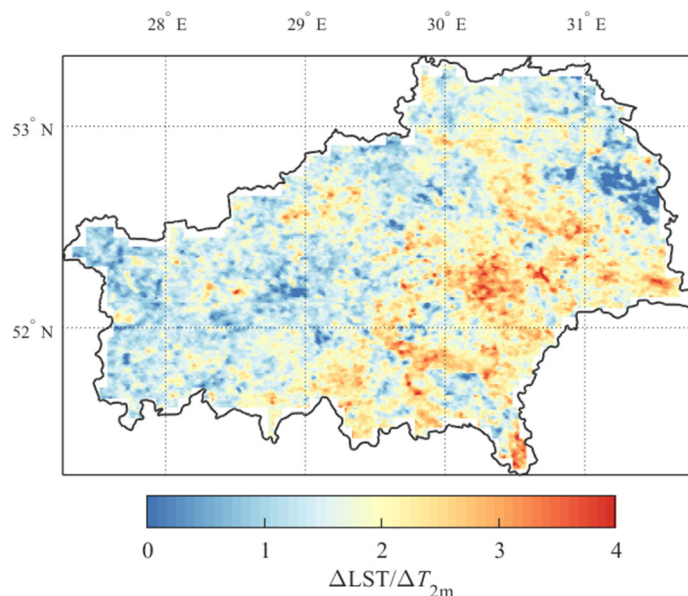


Рис. 3. Отношение трендов температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха на высоте 2 м для территории Гомельской области

Fig. 3. Ratio of trends of land surface temperature to air temperature at 2 m altitude for Homiel region

Среднее отношение трендов LST и T_{2m} для Гомельской области составляет примерно 1,69 и позволяет пересчитать оценки изменения LST в районах Гомельской области в результате заболачивания в соответствующие изменения T_{2m} . Полученные результаты представлены на рис. 2, а. Максимальное уменьшение температуры воздуха в районах Беларуси, оцененное таким образом, составляет 0,29 °С. Более существенным в данном сценарии мелиорации является изменение амплитуды суточного цикла температуры воздуха до 0,8 °С (рис. 2, б), что также согласуется с результатами численного моделирования.

Аналогичным способом на основе данных ДЗЗ получены оценки изменения среднесуточной температуры воздуха и амплитуды ее суточного цикла для сценария облесения пахотных земель. Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

Максимальное уменьшение среднесуточной температуры воздуха наблюдается на востоке области и составляет примерно 0,23 °С. Эта оценка достаточно неплохо согласуется с расчетами на основе мезомасштабной численной модели WRF, согласно которым максимальное уменьшение среднесуточной температуры в вегетационный период для рассматриваемого сценария составляет 0,29 °С.

Максимальное изменение амплитуды суточного цикла T_{2m} в сценарии мелиорации с облесением земель составляет –0,85 °С согласно расчетам на основе модели WRF и –1,4 °С согласно расчетам на основе данных ДЗЗ.

Рассмотрим теперь оценки изменения скрытого потока тепла на мелиорируемой территории. Соответствующие результаты численного моделирования для двух рассматриваемых сценариев представлены на рис. 5. Оценки на основе данных ДЗЗ приведены на рис. 6. В численном эксперименте с заболачиванием земель наблюдается малозначительное увеличение испарения – скрытый поток тепла (LH) в мелиорируемом регионе увеличивается на 0,15 Вт/м². Примерно такую же величину его увеличения – 0,24 Вт/м² – дают расчеты на основе данных ДЗЗ.

Более существенное увеличение потока скрытого тепла – максимально на 1,0–1,5 Вт/м² – наблюдается в численном эксперименте с облесением земель. Эти оценки превосходно согласуются с расчетами на основе данных ДЗЗ: среднее увеличение LH в мелиорируемом регионе составляет 0,68 согласно результатам численного моделирования и 0,60 согласно расчетам на основе данных ДЗЗ.

Таким образом, проверка результатов численного моделирования климатических последствий мелиорации независимым методом подтверждает достоверность полученных оценок. Два совершенно разных метода моделирования влияния мелиорации на климат дают очень близкие оценки изменения метеорологических величин. Согласно представленным результатам, при заболачивании земель максимальное понижение среднесуточной температуры на мезомасштабном уровне составит 0,2–0,3 °С, максимальное изменение потока скрытого тепла – около +0,66 Вт/м², что соответствует увеличению месячного испарения на 6,1 мм. Перепады температуры на протяжении суток в результате заболачивания уменьшаются в среднем на 0,8 °С, что сделает климат мелиорированных земель более умеренным.

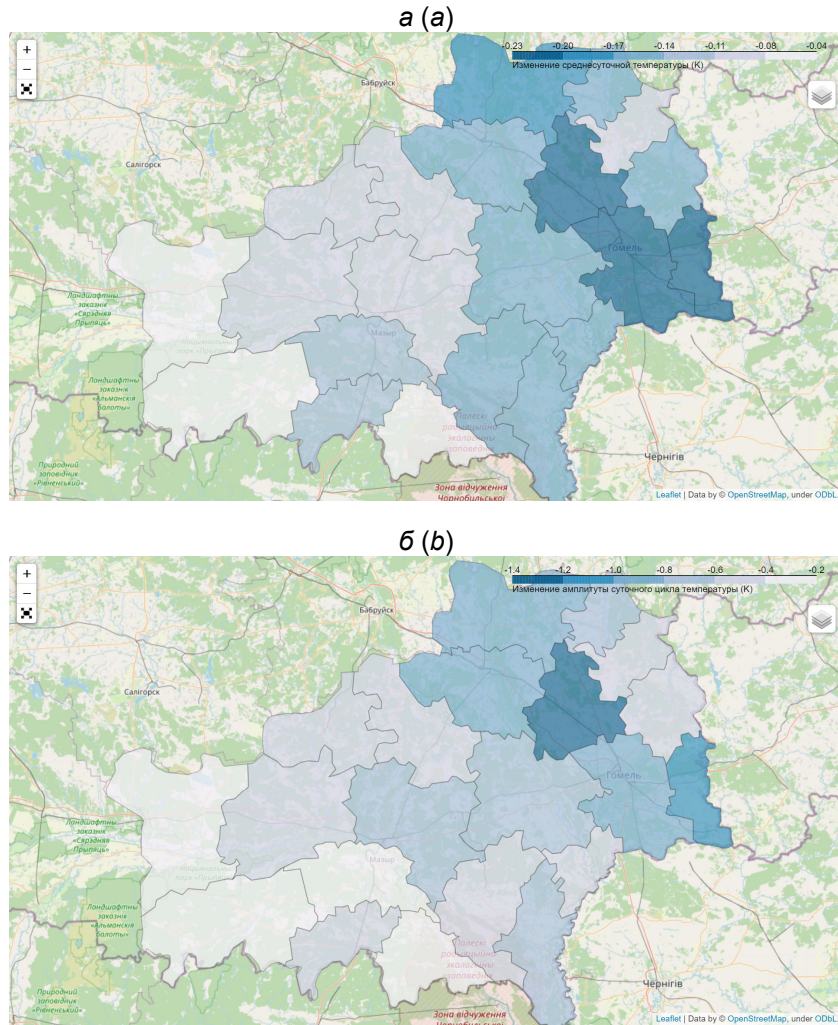


Рис. 4. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений среднесуточной температуры воздуха (а) и амплитуды суточного цикла температуры (б) в районах Гомельской области для сценария мелиорации с облесением земель

Fig. 4. Estimations of changes in average daily temperature of Earth remote sensing data (a) and amplitude of diurnal temperature cycle (b) under the reforestation melioration scenario in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

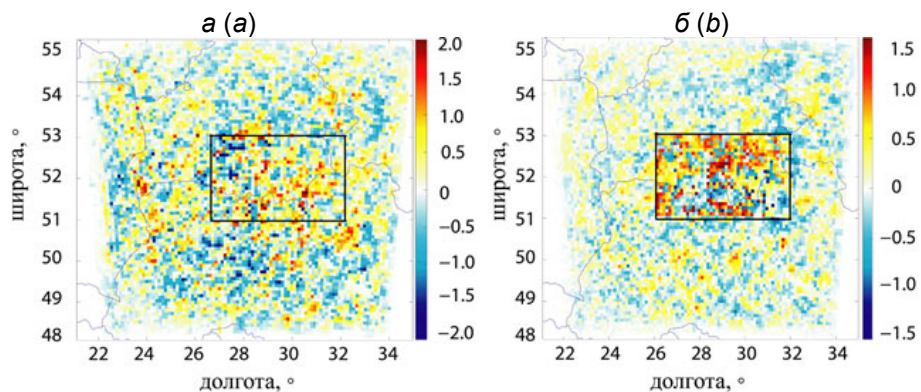


Рис. 5. Изменения среднего потока скрытого тепла LH (Вт/м²), рассчитанные для вегетационного периода 2015 г. на основе модели WRF при двух сценариях мелиорации в регионе Белорусского Полесья (выделен боксом): а – заболачивание; б – облесение

Fig. 5. Changes in latent heat flux LH (W/m²) calculated for the growing season of 2015 using WRF model under two melioration scenarios in Belarusian Polesie region (highlighted by a box): a – re-swamping; b – reforestation

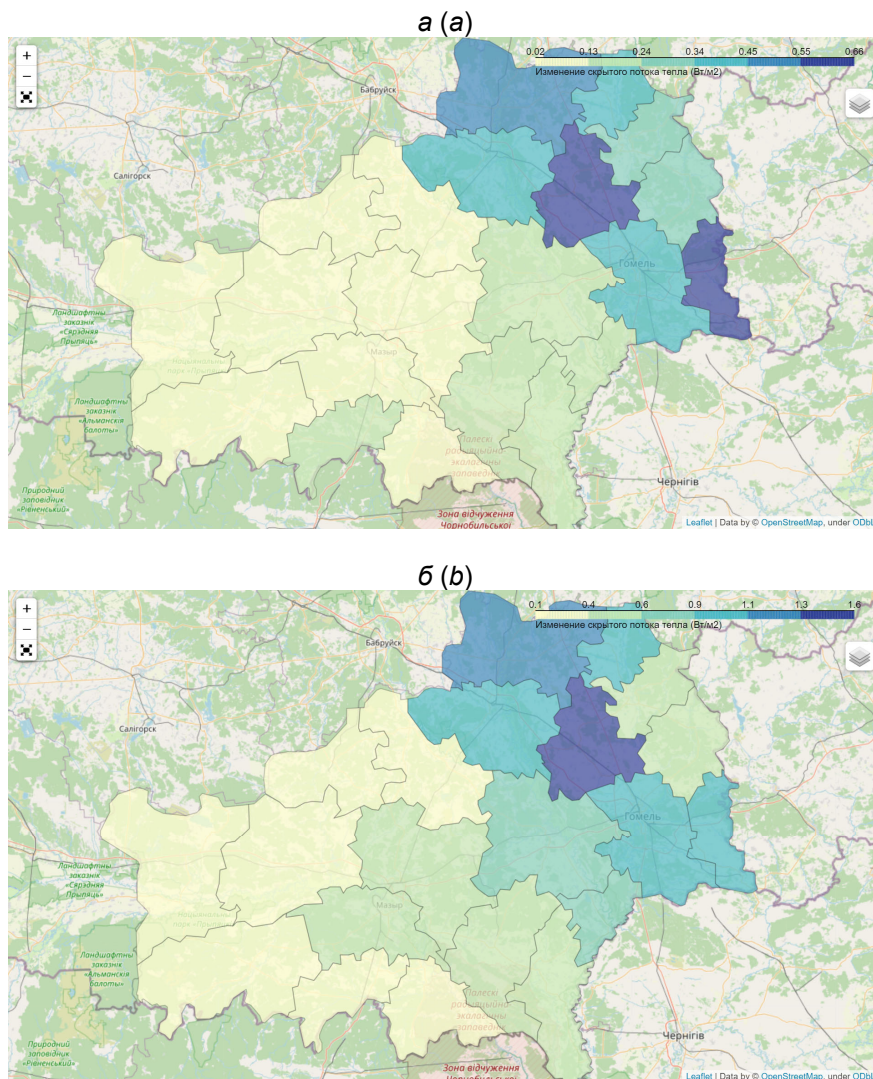


Рис. 6. Оценки по данным дистанционного зондирования Земли изменений скрытого потока тепла в районах Гомельской области для сценариев мелиорации с заболачиванием (а) и облесением (б) земель

Fig. 6. Estimations of changes in latent heat flux under the scenarios of waterlogging (a) and reforestation (b) of arable lands of Earth remote sensing data in administrative districts of Homiel region using remote sensing data

Процесс увеличения лесистости приведет к понижению среднесуточной температуры воздуха на 0,23–0,29 °С с максимальным эффектом на востоке Гомельской области. Амплитуда суточного цикла температуры в результате увеличения лесистости уменьшится на 0,85–1,4 °С. Поток скрытого тепла, обеспечивающий охлаждение земной поверхности в вегетационный период, увеличится максимально на 1,5–1,6 Вт/м², что соответствует величине месячного испарения 13,6–14,7 мм.

Что касается атмосферных осадков, то значимых тенденций их изменений на мелиорируемых землях не выявлено ни в одном из выполненных численных экспериментов. Мезомасштабное метеорологическое моделирование показывает отсутствие значимых изменений общей и конвективной облачности в рассматриваемом регионе. Это свидетельствует 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. Для оценки влияния на атмосферные осадки притока влаги в результате ее испарения с земной поверхности использовали описанный выше метод расчета рециркуляции осадков. На первом этапе на основе уравнений (3) и реанализа

ERA5 рассчитывали вклад испарения на мелиорируемой территории в пространственное распределение атмосферных осадков. Далее, на основании данных спутниковых изменений и приведенных выше оценок изменений эвапотранспирации в районах Беларуси при различных сценариях мелиорации, рассчитывали вклад каждого района в сумму атмосферных осадков и их кумулятивный вклад в распределение осадков на исследуемой территории.

Изменение поля атмосферных осадков, рассчитанное для летнего сезона 2023 г. в сценарии увеличения лесистости Гомельской области, представлено на рис. 7. Нужно отметить, что данному сценарию соответствуют наибольшее увеличение эвапотранспирации в мелиорируемом регионе, поэтому он является показательным в части влияния мелиорации на атмосферные осадки. Летний период года, взятый для демонстрации этого влияния, также является показательными, поскольку для него в наибольшей степени проявляется влияние мезомасштабной конвекции на процессы формирования облаков и осадков.

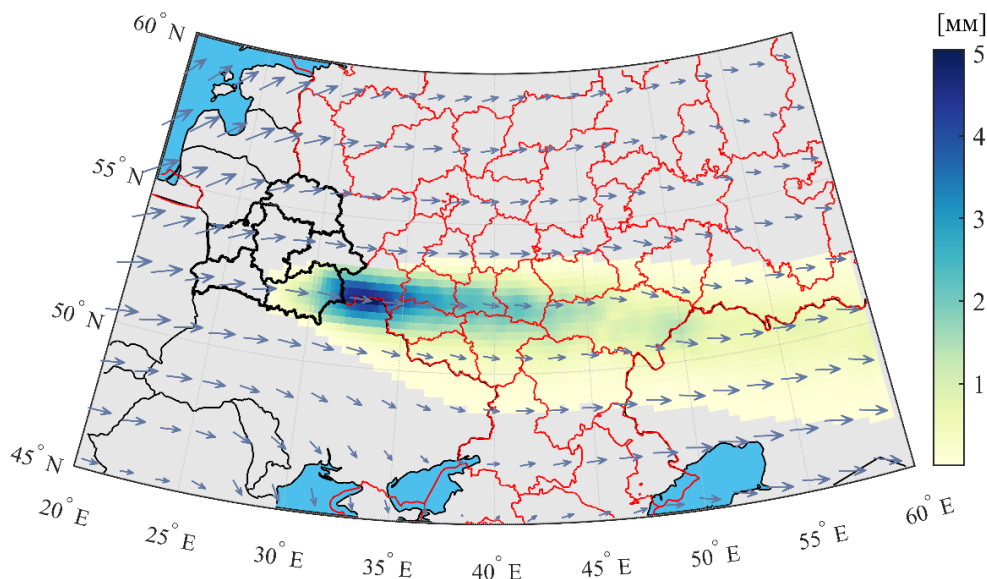


Рис. 7. Изменение поля атмосферных осадков в летний период 2023 г. в сценарии увеличения лесистости Гомельской области

Fig. 7. Changes in atmospheric precipitation field in summer of 2023 under the scenario of reforestation in Homel region

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 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.

Выводы.

1. Полученные оценки климатических последствий мелиорации на территории Белорусского Полесья 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.

2. 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.

3. 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 °С.

4. Увеличение лесистости на мезомасштабном уровне приведет к понижению среднесуточной температуры воздуха на 0,2–0,3 °С с максимальным эффектом на востоке Гомельской области. Амплитуда суточного цикла температуры в результате увеличения лесистости сократится на 0,9–1,4 °С, а среднемесячное испарение в вегетационный период увеличится максимально на 14 мм.

Список использованных источников

1. Лысенко, С. А. Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь / С. А. Лысенко, И. В. Бужков // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2020. – № 3. – С. 22–41.
2. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
3. Изменения климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск : Тонпик, 2003. – 330 с.
4. Шебеко, В. Ф. Влияние осушительных мероприятий на водный режим территорий / В. Ф. Шебеко. – Минск : Ураджай, 1983. – 200 с.
5. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // *Изв. Рос. акад. наук. Сер. географическая*. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
6. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исследование Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
7. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // *Метеорология и гидрология*. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
8. Лысенко, С. А. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах Беларуси / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, Ю. А. Бондаренко // *Природопользование*. – 2020. – № 1. – С. 20–29.
9. Костин, С. И. Климатология / С. И. Костин, Т. В. Покровская. – Л. : Гидрометеиздат, 1961. – 235 с.
10. Рахманов, В. В. Гидроклиматическая роль лесов / В. В. Рахманов. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 240 с.
11. Федоров, С. Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне европейской территории СССР / С. Ф. Федоров. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 264 с.
12. Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок / С. Ф. Федоров [и др.] // *Труды Государственного гидрологического института*. – 1981. – Вып. 279. – С. 20–31.
13. Широков, В. М. Изменение микроклимата побережий и акваторий водохранилищ в пригородных зонах Беларуси / В. М. Широков, П. С. Лопух // *Климатические ресурсы Беларуси и их рациональное использование*. – Минск : Университетское, 1986. – С. 88–93.
14. Лихацевич, А. П. Мелиорация земель в Беларуси / А. П. Лихацевич, А. С. Мееровский, Н. К. Вахонин. – Минск : БелНИИМил, 2001. – 308 с.
15. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия / А. В. Ольчев [и др.] // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2017. – Т. 4. – С. 79–101.
16. Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model / X. Li [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2018. – Vol. 103. – P. 115–126.
17. Brubaker, K. Estimation of Continental Precipitation Recycling / K. Brubaker, D. Entekhabi, P. S. Eagleson // *J. Clim.* – 1993. – Vol. 6, № 6. – P. 1077–1089.
18. The contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East Asian precipitation and its variability / L. Guo [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2018. – Vol. 51, № 1–2. – P. 4139–4156.
19. Eltahir, E. A. B. Precipitation recycling in the Amazon basin / E. A. B. Eltahir, R. L. Bras // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 1994. – Vol. 120, № 518. – P. 861–880.

References

1. Lysenko S. A., Buyakov I. V. *Osobennosti sovremennogo izmeneniya klimata v Respublike Belarus'* [The key features of the current climate change in the Republic of Belarus]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2020, no. 3, pp. 22–41 (in Russian).
2. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya, 2-e izd.* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities. 2nd ed.]. Minsk, Enciklopediks Publ., 2020, 264 p. (in Russian).
3. Loginov V. F., Sachok G. I., Mikutsky V. S., Mel'nik V. I., Kolyada V. V. *Izmeneniya klimata Belarusi i ih posledstviya* [Climate change in Belarus and its consequences]. Minsk, Tonpik Publ., 2003, 330 p. (in Russian).
4. Shebeko V. F. *Vliyaniye osushitel'nykh meropriyatiy na vodnyy rezhim territoriy* [Effect of drainage measures on water regime of territories]. Minsk, Uradzhay Publ., 1983, 200 p. (in Russian).

5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Homich V. S., Semenchenko V. P., Kulak A. V., Stepanovich I. M. *Priznaki aridizatsii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi* [Climate aridization signs and their ecosystem displays on the territory of Belarus]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Bulletin of RAS. Geography*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515–527 (in Russian).
6. Lysenko S. A. *Klimatoobuslovlennyye izmeneniya bioproduktivnosti nazemnykh ekosistem Belarusi* [climate-related changes in bioproductivity of terrestrial ecosystems in Belarus]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Research of Earth from space*, 2019, no. 6, pp. 77–88 (in Russian).
7. Lysenko S. A., Zaiko P. O., Loginov V. F. *Vliyanie izmeneniy klimata na bioproduktivnost' nazemnykh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Climate change impacts on bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie region]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, no.1, pp. 59–71 (in Russian).
8. Lysenko S. A., Loginov V. F., Bondarenko Yu. A. *Vzaimosvyaz' sovremennykh izmeneniy ispareniya i kolichestva osadkov v yuzhnykh regionah Belarusi* [Relationship of modern changes in evaporation and number of precipitations in the southern regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no.1, pp. 20–29 (in Russian).
9. Kostin S. I., Pokrovskaya T. V. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 235 p. (in Russian).
10. Rahmanov V. V. *Gidroklimaticheskaya rol' lesov* [Hydroclimatic role of forests]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984, 240 p. (in Russian).
11. Fedorov S. F. *Issledovanie elementov vodnogo balansa v lesnoy zone evropeyskoy terrotorii SSSR* [Study of water balance elements in the forest zone of European territory of USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 235 p. (in Russian).
12. Fedorov S. F., Marunoch S. F., Burov A. S., Ral'cevlch N. D. *Izmenenie struktury vodnogo i teplovogo balansa zalesennykh territorii pod vliyaniem vyrubok* [Changes of water and heat balance structure of forested territories under the effect of deforestation]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta = Proc. of the State hydrology institute*, 1981, vol. 279, pp. 20–31 (in Russian).
13. Shirokov V. M., Lopuh P. S. *Izmenenie klimata poberezhnykh i akvatoriy vodohranilishch v prirodnykh zonah Belarusi* [Change in the microclimate of shorelines and water areas of reservoirs in nature zones of Belarus]. *Klimaticheskie resursy Belarusi ii ih racional'noe ispol'zovanie = Climate resources of Belarus and their rational use*. Minsk, Universitetskoe Publ., 1986, pp. 88–93 (in Russian).
14. Lihacevich A. P., Meerovskiy A. S., Vahonin N. K. *Melioratsiya zemel' v Belarusi* [Land melioration in Belarus]. Minsk, BelNIIMiL Publ., 2001, 308 p. (in Russian).
15. Ol'chev A. V., Rozinkina I. A., Kuz'mina E. V., Nikitin M. A., Rivin G. S. *Ocenka vliyaniya izmeneniya lesistosti central'nogo regiona Vostochno-Evropeyskoy ravniny na letnie pogodnye usloviya* [Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European plain]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2017, vol. 4, pp. 79–101 (in Russian).
16. 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, vol. 103, pp. 115–126.
17. Brubaker K., Entekhabi D., Eagleson P. S. Estimation of Continental Precipitation Recycling. *J. Clim.*, 1993, vol. 6, no. 6, pp. 1077–1089.
18. 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, vol. 51, no. 1–2, pp. 4139–4156.
19. Eltahir E. A. B., Bras R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, vol. 120, no. 518, pp. 861–880.

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Зайко Полина Олеговна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: polly_lo@tut.by

Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Polina O. Zaiko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: polly_lo@tut.by