

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**EARTH SCIENCES**

УДК 551.582; 551.588

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-238-246>

Поступило в редакцию 12.04.2024

Received 12.04.2024

С. А. Лысенко*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА ПОВТОРНО
ЗАБОЛАЧИВАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

Аннотация. На основе мезомасштабной гидродинамической модели WRF (Weather Research and Forecasting), балансовой модели атмосферной влаги и данных дистанционного зондирования Земли получены оценки изменений микроклимата в результате повторного заболачивания земель Белорусского Полесья. Расчеты выполнены на примере Хойникского района Гомельской области Беларуси. В численных экспериментах рассмотрены наиболее засушливые летние периоды последних двух десятилетий. По результатам моделирования построены карты изменений среднесуточной температуры, амплитуды суточного хода температуры, суммарного испарения и атмосферных осадков, которые могут использоваться для прогнозирования последствий мелиорации в различных сценариях адаптации к изменению климата.

Ключевые слова: изменение климата, адаптация, повторное заболачивание, испарение, осадки, гидродинамическая модель атмосферы

Для цитирования. Лысенко, С. А. Численное моделирование микроклимата повторно заболачиваемых земель Белорусского Полесья / С. А. Лысенко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 3. – С. 238–246. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-238-246>

Sergey A. Lysenko*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***NUMERICAL MODELING OF MICROCLIMATE OF RE-WATERLOGGED LANDS
OF BELARUSIAN POLESIE***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

Abstract. Based on the mesoscale hydrodynamic model WRF (Weather Research and Forecasting), the balance model of atmospheric moisture and the remote sensing data, we obtained the estimates of microclimate changes as a result of re-swamping of lands in Belarusian Polesie. The calculations were performed on the example of the Khoyniki district of the Gomel region of Belarus. Numerical experiments considered the driest summer periods of the last two decades. Based on the modeling results, the maps of changes in mean daily temperature, amplitude of daily temperature variations, evapotranspiration and precipitation were constructed, which can be used to predict the consequences of land reclamation in different scenarios of adaptation to climate changes.

Keywords: climate change, adaptation, rewetting, evaporation, precipitation, hydrodynamic model of the atmosphere

For citation. Lysenko S. A. Numerical modeling of microclimate of re-waterlogged lands of Belarusian Polesie. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 238–246 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-3-238-246>

Введение. Глобальное потепление последних десятилетий существенно отразилось на климате Белорусского Полесья. Данные метеорологических наблюдений демонстрируют тревожную картину аридизации (усиление засушливости) климата данного региона. В теплый период

года (май–сентябрь) суммарное испарение здесь стало превышать атмосферные осадки на 50–80 мм, тогда как до потепления эта разница была меньше 30 мм (рис. 1). Отношение суммы осадков и потенциального испарения (индекса аридности) для мая–июня в современный период (2000–2022 гг.) изменяется в пределах 0,43–0,51 мм/мм, что в методике глобального агроэкологического зонирования ФАО соответствует семиаридным районам [1].

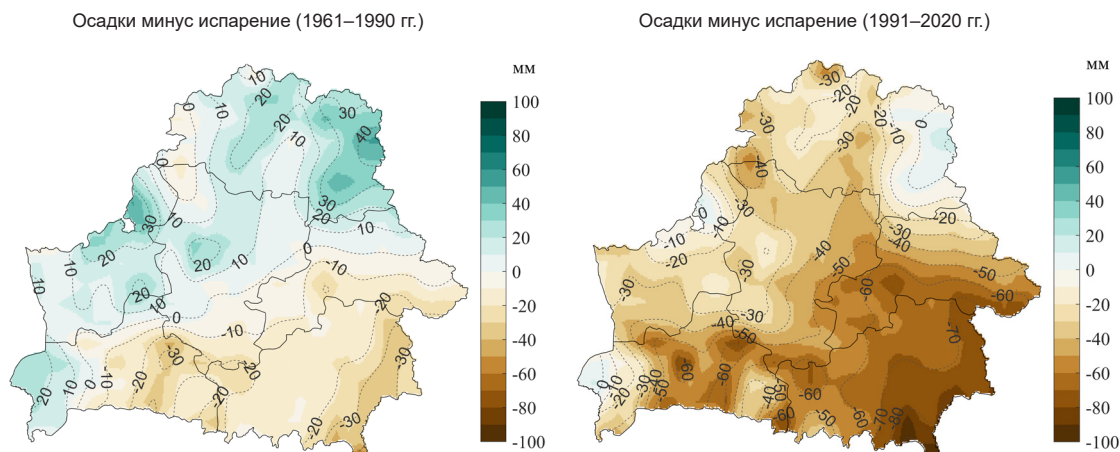


Рис. 1. Средняя разница атмосферных осадков и суммарного испарения в мае–сентябре для современного периода (1991–2020 гг.) и периода до начала потепления в Беларуси (1961–1990 гг.)

Fig. 1. Mean difference of precipitation and evapotranspiration in May-September for the modern period (1991–2020) and the pre-warming period in Belarus (1961–1990)

Увеличение атмосферного стока влаги при отсутствии компенсирующего его роста атмосферных осадков делает почвы Белорусского Полесья более уязвимыми перед волнами тепла и засухами, что особенно остро проявляется для пахотных земель данного региона. Данные спутниковых наблюдений для вегетационного периода показывают статистически значимое снижение индекса листовой поверхности пахотных земель на юго-востоке Беларуси (Гомельская область и восточная часть Брестской области) [2–4]. Около 40 % пахотных земель Гомельской области демонстрируют статистически достоверную ($p < 0,05$) тенденцию уменьшения водного индекса NDWI, рассчитываемого по данным многоспектральной спутниковой съемки и характеризующего содержание воды в почвенно-растительных покровах.

В [4] автором были исследованы прямые и обратные связи между температурой воздуха, температурой почвы и индексом листовой поверхности на территории Беларуси в летний период. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что деградация растительного покрова на юго-востоке Беларуси сопровождается аномальным ростом температуры почвы и амплитуды ее внутрисуточных колебаний. Для пахотных земель снижение индекса листовой поверхности может обуславливать свыше четверти роста средней летней температуры. В свою очередь рост температуры усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к еще большему сокращению растительного покрова. Эти процессы составляют основу положительных обратных связей, ускоряющих аридизацию и летнее потепление в регионе Белорусского Полесья. Триггером для их запуска может служить частичный свод растительного покрова в результате различных хозяйственных мероприятий, а также недостаточность мер по адаптации сельского и лесного хозяйства региона к изменению климата.

В настоящей работе представлены результаты моделирования изменений климата на повторно заболачиваемых землях Белорусского Полесья. В качестве модельного региона выбран Хойникский район Гомельской области. Численные эксперименты выполнены для наиболее засушливых летних периодов последних двух десятилетий – 2002, 2010, 2015, 2018 и 2023 гг. Целью моделирования были оценки потенциальных изменений среднесуточной температуры, амплитуды суточного хода температуры, суммарного испарения и атмосферных осадков в результате повторного заболачивания земель как меры адаптации к изменению климата.

Материалы и методы исследования. Оценки потенциальных последствий заболачивания ранее осушенных земель Гомельского Полесья на климат данного региона проводились на основе мезомасштабной гидродинамической модели WRF (Weather Research and Forecasting) версии 4.3 [5], квазистационарной модели баланса атмосферной влаги [6], данных дистанционного зондирования Земли и основанных на них моделях эвапотранспирации и ее составляющих [7; 8].

В численных экспериментах по заболачиванию ранее осушенных земель Гомельского Полесья проводилась замена земель, относящихся к категории «Cropland», на земли категории «Herbaceous wetland». Подобное преобразование структуры землепользования влечет за собой изменение комплекса физических параметров подстилающей поверхности – альбедо, эвапотранспирации, шероховатости и др., которые в совокупности влияют на радиационный и тепловой балансы подстилающей поверхности, конвективные процессы в планетарном пограничном слое атмосферы, облачность и осадки. Потенциальные изменения этих метеорологических параметров в результате мелиорации оценивались на основе ретроспективных прогнозов гидродинамической модели WRF.

Численное моделирование погоды проводилось для наиболее засушливых летних периодов с начала текущего столетия (2002, 2010, 2015, 2018 и 2023 гг.) при двух сценариях использования ранее осушенных земель: 1) без изменений землепользования; 2) повторное заболачивание. 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 разрешением 1 км, имеющей 33 вертикальных уровня до 5 гПа. В качестве начальных и граничных условий использовались сеточные данные реанализа ERA5 на основе глобальной модели атмосферы с равномерным разрешением по широте и долготе $0,25^\circ$, которые обновлялись каждые 12 ч моделируемого периода. В качестве модельного региона с изменяемой структурой землепользования выбран Хойникский район Гомельской области.

Независимые оценки изменений температуры подстилающей поверхности (LST), амплитуды ее суточного хода и суммарного испарения (эвапотранспирации) основывались на данных спутникового спектрорадиометра MODIS за 2000–2023 гг. Эта задача решалась на основе геопространственного анализа спутниковых продуктов MODIS: LST – дневная и ночная температура подстилающей поверхности, LAI – индекс листовой поверхности, Albedo – сферическое альбедо подстилающей поверхности, FAPAR – фотосинтетически активная радиация, поглощаемая растительным пологом. Суммарное испарение, включающее испарение с почвы, транспирацию растений и испарение перехваченных растениями осадков, рассчитывалось по модели Пенмана–Монтейта–Леунинга [9; 10].

Геопространственные продукты MODIS и параметрические карты на их основе анализировались методом скользящего окна. Для каждого пиксела, отображающего участок земной поверхности с характерным размером от 500 м (для карт испарения и транспирации) до 1 км (для карт температуры), вычислялись средние значения анализируемых геофизических параметров в радиусе 30 км для осушенных и заболоченных земель. В случае принадлежности центрального пиксела скользящего окна первому типу земель, производилась замена соответствующих ему геофизических параметров на средние параметры второго типа. Влияние заболачивания оценивалось по разности средних для окрестностей пикселов значений геофизических параметров до и после моделируемого изменения землепользования. Изменения LST пересчитывались в изменения температуры воздуха с использованием эмпирических коэффициентов, рассчитанных для территории Беларуси в [4].

Для оценок влияния мелиорации на сумму атмосферных осадков использовался балансовый метод расчета рециркуляции (переиспарения) атмосферных осадков, описанный в [5; 6]. Расчеты выполнялись с привлечением данных по осадкам, испарению, зональным и меридиональным потокам влаги из реанализа на основе глобальной модели атмосферы ERA5.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены карты изменений летней среднесуточной температуры воздуха на заболачиваемых землях Хойникского района для наиболее за-

сушливых периодов последних двух десятилетий. Из представленных результатов видно, что заболачивание ранее осушенных земель оказывает значительное охлаждающее воздействие на микроклимат. Понижение среднесуточной температуры в летний период может достигать 3 °С. В среднем для всего района можно говорить о понижении температуры в летний период в пределах 1 °С, что почти на 80 % компенсирует рост летней температуры в данном районе в результате глобального потепления. Максимальный температурный эффект заболачивания достигается в наиболее засушливые летние периоды, что продемонстрировано на рис. 2 для 2002 и 2015 гг., в которые отмечались рекордные по интенсивности и продолжительности засухи.

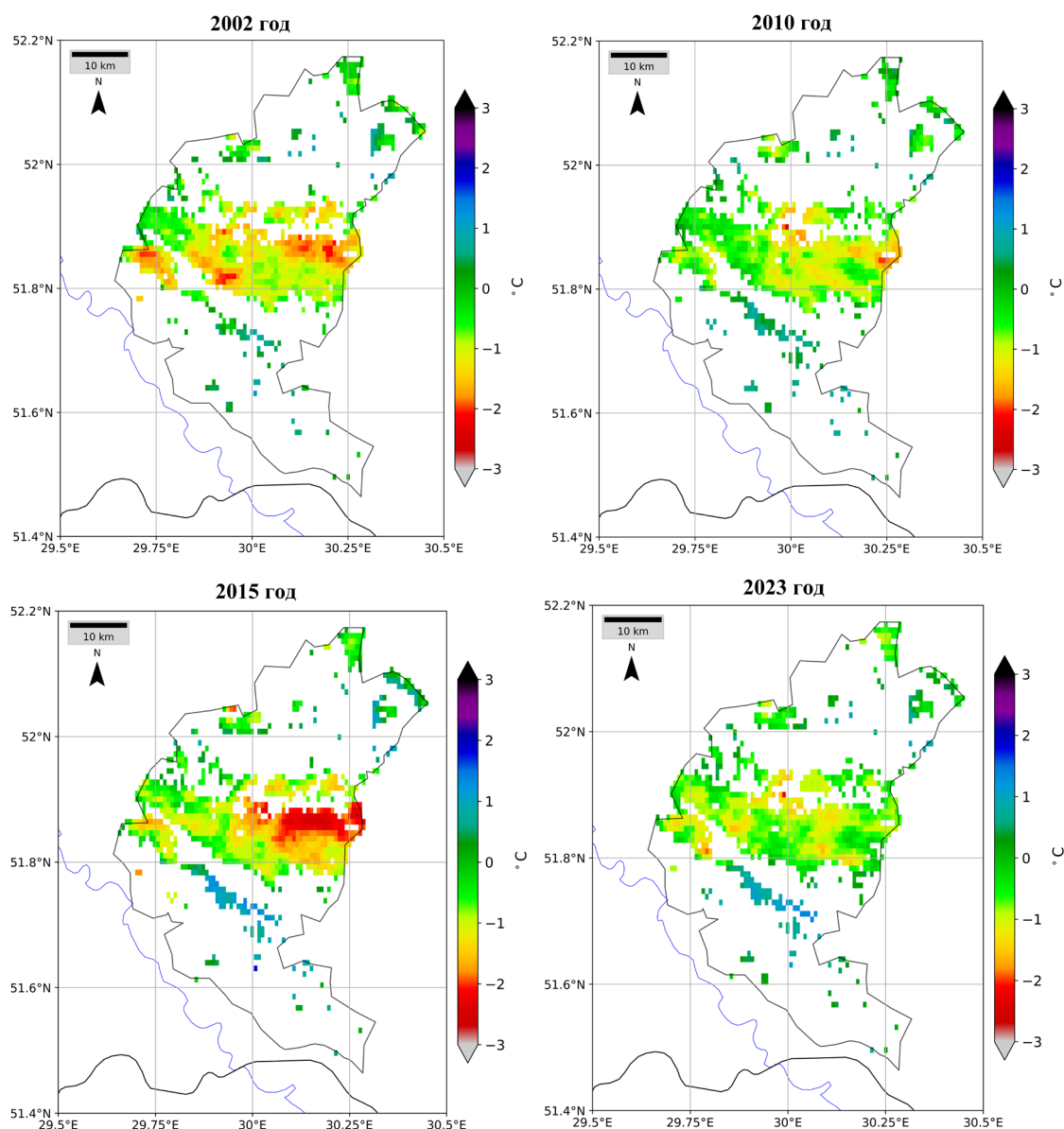


Рис. 2. Оценка изменения среднесуточной температуры воздуха на повторно заболачиваемых землях Хойникского района

Fig. 2. Estimate of changes in summer mean daily air temperature on re-waterlogged lands of Khoyniki district

Другой значимый эффект заболачивания – это смягчение микроклимата. В частности, в численных экспериментах по заболачиванию земель отмечается существенное уменьшение колебаний температуры на протяжении суток (рис. 3) на 2–4 °С, что объясняется ростом удельной теплоемкости и теплопроводности почв, а также изменением радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности в результате заболачивания. В дневное время суток высокая

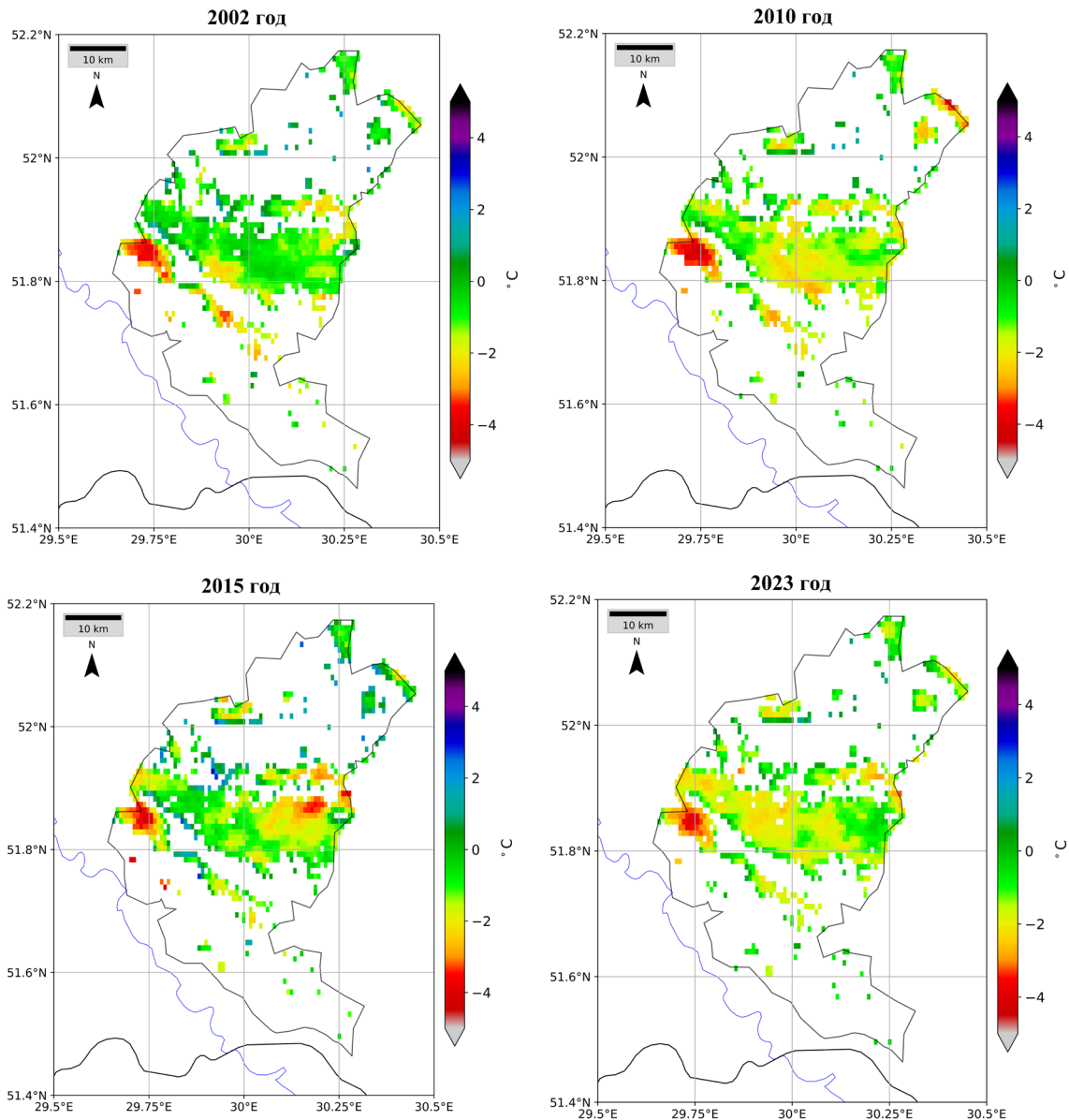


Рис. 3. Оценка изменений амплитуды суточного хода температуры на повторно заболачиваемых землях

Fig. 3. Estimate of changes in the temperature diurnal variability on re-waterlogged lands

влажность заболоченных почв предотвращает их от перегрева. Одновременно с этим высокий коэффициент теплопроводности переувлажненных почв способствует передачи приходящего на их поверхность тепла в более глубокие слои. Это тепло, аккумулируемое днем в глубине почвы, препятствует переохлаждению деятельного слоя почвы в ночное время суток. В результате на заболоченных почвах снижается вероятность как теплового стресса, так и заморозков для растений.

Пространственная структура изменения суммарного испарения, рассчитанная на основе модели Пенмана–Монтейта–Леунинга для сценария повторного заболачивания земель в Хойникском районе, показана для последних наиболее засушливых летних периодов на рис. 4. Представленные результаты демонстрируют существенный рост испарения на заболачиваемых землях. На отдельных участках Хойникского района рост испарения превышает 120 мм (более трети суммарного испарения за летний период), что способно оказывать значительный охлаждающий эффект на климат района.

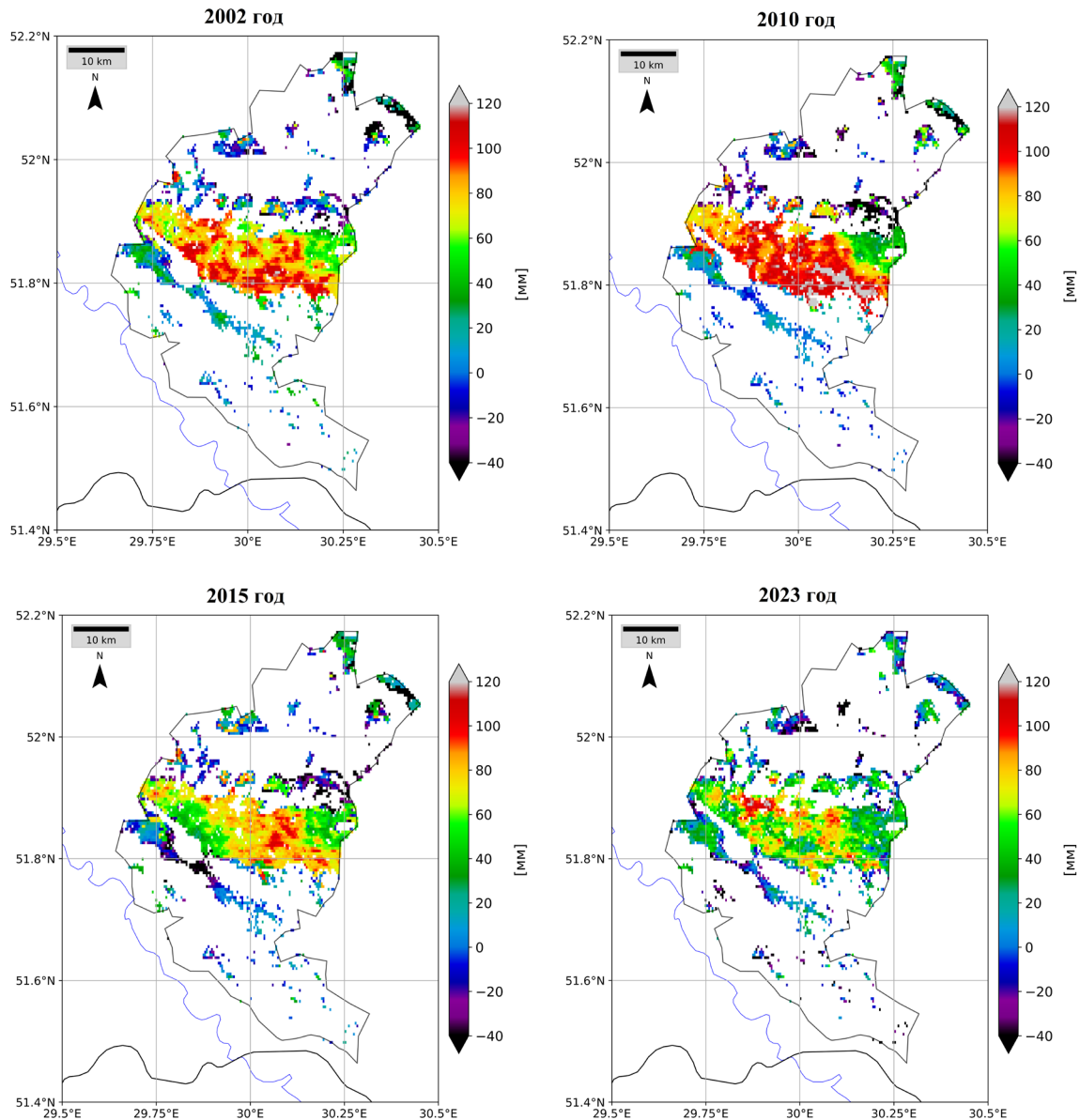


Рис. 4. Оценка изменений суммарного испарения на повторно заболачиваемых землях

Fig. 4. Estimate of changes in evapotranspiration on re-waterlogged lands

Что касается атмосферных осадков, то значимых тенденций их изменения на мелиорируемых землях не выявлено ни в одном из выполненных численных экспериментов. Мезомасштабное гидродинамическое моделирование также показывает отсутствие значимых изменений общей и конвективной облачности в рассматриваемом регионе. Это говорит о том, что повторное заболачивание земель Белорусского Полесья не вызывает заметных изменений характеристик конвекции в пограничном слое атмосферы. Исходя из этого, можно сделать вывод, что конвективные движения в рассматриваемом регионе главным образом стимулируются крупномасштабными восходящими движениями и притоком влаги в результате ее горизонтальной адвекции.

Оценка изменений атмосферных осадков в результате повторного заболачивания земель Хойникского района, полученная на основе балансового метода расчета рециркуляции осадков, представлена на рис. 5. Видно, что несмотря на значительное увеличение испарения на заболоченных землях, осадки в районе мелиорации возрастают крайне незначительно – в пределах 1 мм. Большая часть испарившейся в районе влаги конденсируется и выпадает в виде атмосферных

осадков на прилегающих территориях. Область выпадения осадков зависит от синоптических условий и преобладающего направления атмосферного переноса. В большинстве случаев на Беларусь приходится лишь незначительная часть осадков, а большая их часть выпадает на прилегающих территориях России и Украины.

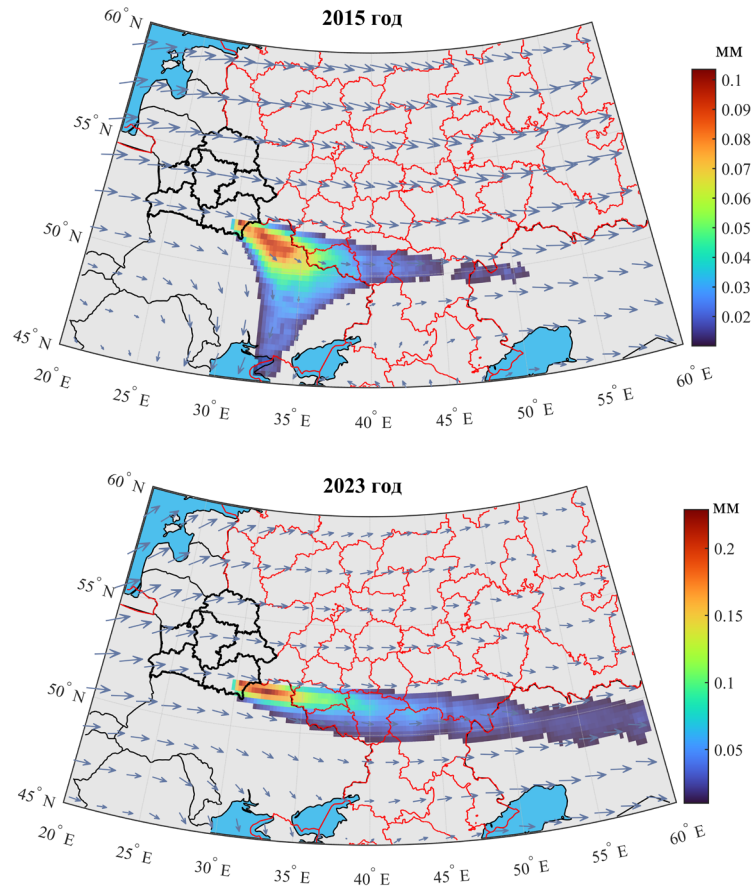


Рис. 5. Увеличение атмосферных осадков в летний период вследствие повторного заболачивания земель Хойникского района по результатам моделирования для 2015 и 2023 г.

Fig. 5. Increase in summer precipitation due to re-waterlogging of Khoyniki district lands based on modeling results for 2015 and 2023

Заключение. Данные метеорологических наблюдений последних 3–4 десятилетий показывают, что в регионе Белорусского Полесья идет интенсивная аридизация климата. Отношение суммы осадков и потенциального испарения на территории Гомельской области для теплого периода года составляет 0,46–0,58 (2000–2023 гг.), тогда как до потепления (1961–1990 гг.) это отношение находилось в диапазоне 0,62–0,68.

Согласно расчетам глобальных гидродинамических моделей международного проекта СМIP6, средняя температура в Гомельской области в теплый период года к середине текущего столетия увеличится на 3,0–3,8 °C по отношению к базовому периоду 1961–1990 гг. При этом, значимых изменений суммы атмосферных осадков в теплый период года, по крайней мере до середины столетия, не ожидается, что означает дальнейшую аридизацию климата данного региона.

Одной из наиболее эффективных мер адаптации к изменению климата Белорусского Полесья является повторное заболачивание ранее осушенных земель, способствующее улучшению их водного баланса и биологической продуктивности. Представленные в сообщении результаты модельных экспериментов по влиянию заболачивания на микроклимат позволяют получить количественные представления об изменениях температуры воздуха, амплитуды суточного хода температуры, суммарного испарения и суммы атмосферных осадков на заболачиваемых землях.

Согласно выполненным расчетам для Хойникского района Гомельской области, среднесуточная температура на заболочиваемых землях в летний период может понизиться на 3 °С, в целом для всего района – максимально на 1 °С. Климат заболочиваемых земель становится более мягким: амплитуда суточных колебаний температуры уменьшается на 2–4 °С, понижаются риски теплового стресса и заморозков для растений. Суммарное испарение в засушливые летние периоды возрастает на 40–100 мм, что оказывает значительный охлаждающий эффект на уровне всего района. В то же время значимого роста атмосферных осадков, общей и конвективной облачности в результате заболочивания не происходит. Конвективные процессы в рассматриваемом регионе главным образом стимулируются крупномасштабными восходящими движениями и притоком влаги в результате ее горизонтальной адвекции, а фактор роста испарения на повторно заболочиваемых землях обуславливает менее 1 мм осадков в летний период.

Список использованных источников

1. Водный баланс Беларуси и его изменения в результате глобального потепления / С. А. Лысенко [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2024. – № 1. – С. 72–85. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-1-72-85>
2. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>
3. 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. – № 1. – С. 59–71. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-1-59-71>
4. Лысенко, С. А. Прямые и обратные связи между температурой подстилающей поверхности и листовым индексом на территории Беларуси в летний период / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2023. – № 2. – С. 16–30. <https://doi.org/10.31857/S0205961423010074>
5. Лысенко, С. А. Потенциальные климатические последствия увеличения лесистости и заболочивания земель на территории Беларуси / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 149–164. <https://doi.org/10.31857/S0002351523020049>
6. 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.
7. Лысенко, С. А. Повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси с использованием оперативных спутниковых данных / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Природопользование*. – 2022. – № 2. – С. 86–98.
8. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2021. – № 4 (382). – С. 50–68. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>
9. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation / R. Leuning [et al.] // *Water Resour. Res.* – 2008. – Vol. 44, N 10. <https://doi.org/10.1029/2007wr006562>
10. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components / Y. Q. Zhang [et al.] // *Sci. Reports*. – 2016. – Vol. 6. – Art. 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>

References

1. Lysenko S. A., Loginov V. F., Buyakov I. V., Brovka Yu. A. Water balance of Belarus and its changes due to global warming. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, vol. 49, no. 1, pp. 52–61. <https://doi.org/10.3103/s1068373924010072>
2. Lysenko S. A. Climate-Forced Changes of Bioproduktivty of Terrestrial Ecosystems in Belarus. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, pp. 1080–1089. <https://doi.org/10.1134/s0001433820090169>
3. Lysenko S. A., Loginov V. F., Zaiko P. O. Climate Change Impacts on Bioproduktivty of Terrestrial Ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie Region. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, no. 1, pp. 41–49. <https://doi.org/10.3103/s1068373922010058>
4. Lysenko S. A. Forward and Backward Linkages between Land Surface Temperature and Leaf Area Index for the Summer in Belarus. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, pp. 1137–1149. <https://doi.org/10.1134/s000143382309013x>
5. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Potential Climate Impacts of Afforestation and Waterlogging in Belarus. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, pp. 131–143. <https://doi.org/10.1134/s0001433823020044>
6. Lysenko S. A., Loginov V. F., Bondarenko Yu. A. Relationship of modern changes in evaporation and number of precipitation in the Southern regions of Belarus. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 20–29 (in Russian).
7. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Improving the accuracy of numerical weather forecasts in Belarus using operational satellite data. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 86–98 (in Russian).
8. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature in Belarus using the WRF model. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2021, no. 4 (382), pp. 50–68 (in Russian). <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>

9. Leuning R., Zhang Y. Q., Rajaud A., Cleugh H., Tu K. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman–Monteith equation. *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, no. 10. <https://doi.org/10.1029/2007wr006562>

10. Zhang Y. Q., Peña-Arancibia J. L., McVicar T. R., Chiew F. H. S., Vaze J., Liu C., Lu X., Zheng H., Wang Y., Liu Y. Y., Miralles D. G., Pan M. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.