

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 551.583; 632.35А/З

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-151-165

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ВОДЯНКИ БЕРЕЗЫ

Екатерина Александровна Богдан¹, Рита Галимьяновна Камалова², Лариса Николаевна Белан³,
Ирэн Ольвертовна Туктарова⁴

^{1, 2, 3, 4} Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

¹ eavolkova@bk.ru, Scopus Author ID: 57807449000, WOS Research ID: ACM-8732-2022, ID РИНЦ: 852130

² galim-rita@yandex.ru, Scopus Author ID: 57226748324, WOS Research ID: AAD-2923-2022, ID РИНЦ: 730901

³ Belan77767@mail.ru, Scopus Author ID: 56671294600, WOS Research ID: AAD-2968-2022

⁴ umrko@mail.ru, Scopus Author ID: 6701446968, WOS Research ID: H-6747-2017, ID РИНЦ: 455079

Аннотация. Актуальной проблемой для России и сопредельных государств, которую многие связывают с изменением климата, является распространение инфекционных заболеваний древостоя, в частности бактериальной водянки березы. На древесную растительность оказывает значительное влияние температура почвы. Эффективность применения дистанционных методов для построения карт температурного режима доказана многими исследованиями.

В статье представлен подход к построению карт температурного режима поверхностного слоя почв на основании данных наземных исследований и результатов дешифрирования тепловых каналов спутниковых снимков программы Landsat. По данным наблюдений 2020–2022 гг. определены коэффициенты пересчета температуры поверхности Земли и температуры почвы. На основании снимков Landsat 5 и Landsat 8–9 за период 2009–2022 гг. построены карты распределения температуры поверхностного слоя почвы в глобальном геопарке ЮНЕСКО «Янган-Тау» в бесснежный период.

По данным метеостанции Дуван, для территории геопарка «Янган-Тау» характерен тренд к аридизации климата.

40 % территории лесного фонда геопарка «Янган-Тау» занимают березовые леса, потеря которых приведет к снижению эстетичности территории геопарка и целостности лесных и лесостепных экосистем. В этой связи изучение особенностей распространения бактериальной водянки березы крайне актуально.

Наземными исследованиями, а также путем визуального дешифрирования были выделены 12 очагов бактериальной водянки березы на территории геопарка.

Сопоставление мест расположения очагов бактериальной водянки березы с картой распределения температурного режима поверхностного слоя почв в бесснежный сезон показало преимущественное расположение зараженных деревьев в зоне со средней температурой 9,6 °С, в то время как здоровые березовые леса больше произрастают в зонах со средней температурой 7,6 °С.

Соотнесение участков распространения зараженного березового древостоя с уклоном поверхности и NDWI особенностей не выявило.

Оценка экспозиции показала частое расположение очагов бактериальной водянки березы на юго-восточных склонах.

Ключевые слова: бактериальная водянка березы, температура почвы, дистанционные методы, изменение климата, глобальный геопарк ЮНЕСКО «Янган-Тау»

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Программа создания и функционирования карбонового полигона на территории Республики Башкортостан «Евразийский карбоновый полигон» на 2022–2023 гг. (Номер для публикаций: FEUR-2022-0001).

Для цитирования: Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О. Влияние климатических изменений на распространение бактериальной водянки березы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 1(68). С. 151–165. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-151-165



Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

ECOLOGY AND NATURE USE

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-151-165

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE SPREAD OF BACTERIAL WETWOOD OF BIRCH

Ekaterina A. Bogdan¹, Rita G. Kamalova², Larisa N. Belan³, Iren O. Tuktarova⁴

^{1, 2, 3, 4} Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹ eavolkova@bk.ru, Scopus Author ID: 57807449000, WOS Research ID: ACM-8732-2022, ID РИНЦ: 852130

² galim-rita@yandex.ru, Scopus Author ID: 57226748324, WOS Research ID: AAD-2923-2022, ID РИНЦ: 730901

³ Belan77767@mail.ru, Scopus Author ID: 56671294600, WOS Research ID: AAD-2968-2022

⁴ umrko@mail.ru, Scopus Author ID: 6701446968, WOS Research ID: H-6747-2017, ID РИНЦ: 455079

Abstract. An urgent problem for Russia and neighboring countries, which many associate with climate change, is the spread of infectious diseases of the stand, in particular bacterial wetwood of birch. Woody vegetation is also significantly affected by soil temperature. The effectiveness of using remote methods for constructing temperature maps has been proven by many studies.

The article presents an approach to the construction of the surface soil temperature regime maps on the basis of ground-based research data and decryption of thermal channels of Landsat satellite images. Based on the observation data of 2020-2022, the conversion coefficients of the Earth's surface temperature into soil temperatures were determined. Landsat 5 and Landsat 8-9 images for the period 2009-2022 were used to construct maps of temperature distribution in the surface soil layer in the Yangan-Tau UNESCO Global Geopark during the snowless period (from May to October).

According to the data of the Duван weather station, the trend toward climate aridification is characteristic of the territory of the Yangan-Tau Geopark.

40% of forests in the territory of the Yangan-Tau Geopark is occupied by birch, the loss of which will lead to a decrease in the territory's aesthetics and will reduce the integrity of the forest and forest-steppe ecosystems. Thus, the study on bacterial wetwood spread in birch appears to be extremely relevant.

In field studies, as well as by visual interpretation, 12 foci of bacterial wetwood of birch were identified on the territory of the geopark.

Comparison of the birch bacterial wetwood foci locations with the surface soil temperature regime distribution map in the snowless season showed the predominant location of infected trees in an area with an average temperature of 9.6 °C, while sound birch forests mainly grow in areas with an average temperature of 7.6 °C.

Comparison of the infected birch stand distribution sites with the surface slope and NDWI did not reveal any specific features.

The exposure assessment showed a frequent location of birch bacterial wetwood foci on the southeastern slopes.

Keywords: bacterial wetwood of birch, soil temperature, remote methods, climate change, Yangan-Tau UNESCO Global Geopark

Funding: The study was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 'Program for the creation and operation of a carbon test site in the territory of the Republic of Bashkortostan 'Eurasian carbon test site' for 2022-2023' (No. FEUR-2022-0001).

For citation: Bogdan, E.A., Kamalova, R.G., Belan, L.N., Tuktarova, I.O. (2024). The impact of climate change on the spread of bacterial wetwood of birch. *Geographical Bulletin*. No. 1(68). Pp. 151–165. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-151-165

Введение

Для многих стран существует проблема ухудшения санитарного состояния лесов, вызванная бактериальной заболеваемостью древостоя. Так, в Иране массовая заболеваемость бактериальной водянойкой вязовых лесов приняла характер эпифитотии [20, 21]. В России, в Восточной Сибири, отмечается усыхание кедров, которое также имеет бактериальную природу [5]. В Татарстане имеется значительное распространение бактериальной заболеваемости осины [15].

Одним из наиболее агрессивных бактериальных заболеваний деревьев является бактериальная водянка березы (БВБ), вызванная бактерией *Erwinia multivora* Sch.-Parf. С проблемой интенсивного распространения этой болезни березы сталкиваются не только в России, но в других сопредельных государствах [2, 17, 27].

*Экология и природопользование**Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.*

Заболевание проявляется в усыхании верхушек деревьев, ветвей, появлении водяных побегов желто-коричневого цвета, мокнущих вздутий на стволах, изреживании крон. В результате заболевания дерево гибнет, превращаясь в остов из коры, наполненный трухой.

Для Республики Башкортостан данная проблема весьма актуальна. По данным Центра защиты леса Республики Башкортостан, площадь поражения лесных экосистем республики БВБ с 2010 по 2014 г. возросла в 5,3 раза. Это южное заболевание берез, впервые описанное в 1963 г. на Северном Кавказе, к настоящему времени распространено по всем районам Республики Башкортостан [3, 4].

Многие авторы связывают распространение данного заболевания с изменением климата [1, 4, 19]. Среди факторов, оказывающих влияние на распространение БВБ, также выделяют почвенные условия. При этом авторы демонстрируют разные выводы. Так, в работе Gouchuk A. и др. (2020) для Украины [27] отмечена приуроченность данного заболевания к сухим и бедным почвам. Тем временем для Средней Сибири исследования Татаринцева А.И. [16, 17] свидетельствуют об обратном – БВБ широко распространена на богатых и увлажненных почвах.

Помимо увлажненности, важным фактором, влияющим на состояние древесной растительности, является температура почвы.

Например, воздействие экстремальных явлений температур почвы может отразиться на уровнях биологической организации [29, 31] и взаимодействовать с другими движущими климатическими переменными, изменяя ареал и устойчивость многих экосистем [33]. Отмечается влияние температуры на микробиологическую активность, минерализацию питательных веществ и дыхание почвы [28, 35], в том числе кратковременные (12 ч) приповерхностные экстремумы температуры почвы $-30-35$ °С [35], а также потепление почвы с 15 до 25 °С [30] значительно снижают микробную активность и почвенное дыхание в экосистемах.

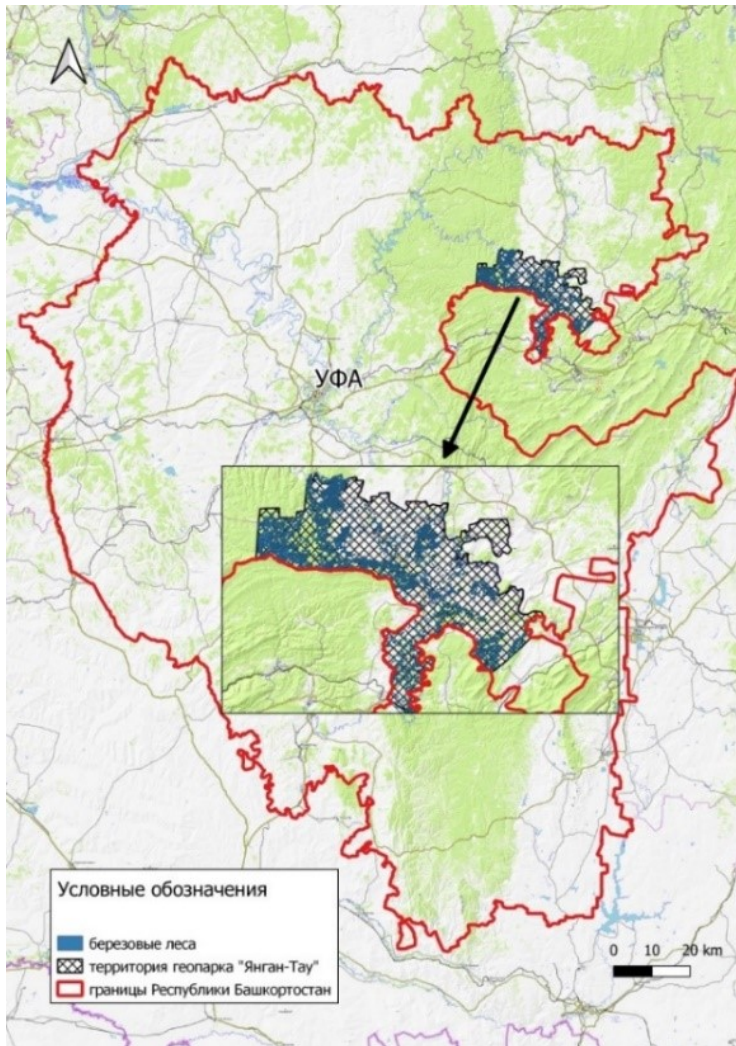
Удобство и эффективность демонстрируют дистанционные методы оценки температуры поверхности Земли с использованием спутниковых данных Landsat. El Garouani M. и др. [25] показали, что температура поверхности имеет высокую корреляцию с температурой воздуха и отличается только на несколько градусов. В работе [12] для города Новосибирска проводилось сравнение данных, полученных на метеорологических станциях и со спутников Landsat. Среднеквадратичное отклонение между значениями температуры варьировалось от 0,5 до 1,9 °С. Для Республики Тыва, по данным спутника Landsat 8, в зимний период 2014–2017 гг. значение поверхностной температуры отличается от температуры воздуха в среднем на 1,9 °С [10].

Таким образом, целью исследования является оценка взаимосвязи развития бактериальной водянки березы и температуры почвы с использованием дистанционных методов. В качестве исследуемой территории выбран геопарк «Янган-Тау», который с 2020 г. входит в сеть глобальных геопарков ЮНЕСКО.

Объект исследования

Исследования проводятся на территории глобального геопарка ЮНЕСКО «Янган-Тау». Геопарк расположен на северо-востоке Республики Башкортостан (Салаватский муниципальный район) (рис. 1.). Площадь – 1774 км². Одна из ключевых позиций в деятельности геопарка – реализация цели устойчивого развития № 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями». В 2021 г. геопарк «Янган-Тау» вошел в программу карбонового полигона Республики Башкортостан как один из участков.

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.



Для понимания условий произрастания березовых лесов в геопарке необходимо дать краткую климатическую характеристику. В целом, климат территории умеренно континентальный с теплым летом и холодной зимой. Средняя годовая температура воздуха данного региона составляет 2,2 °С для периода 1961–2020 гг. (по данным метеостанции Дуван). Наибольшая температура воздуха наблюдается в июле (17,7 °С), наименьшая – в январе (-14,2 °С) (табл. 1).

Рис. 1. Месторасположение глобального геопарка ЮНЕСКО «Янган-Тау»
Fig. 1. Location of the Yangan-Tau UNESCO Global Geopark

Таблица 1

Среднемесячные, среднегодовые температуры воздуха и суммы атмосферных осадков
и показатели их изменчивости
Average monthly and average annual air temperatures, precipitation amounts,
and indicators of their variability

Период	Показатель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1961–1990	t, °С	-15,0	-13,2	-6,4	2,9	10,9	15,4	17,6	14,7	9,3	1,3	-5,9	-11,4	1,7
	КНЛТ t	0,50	0,48	0,38	-0,08	-0,33	1,08	0,16	0,28	0,03	0,06	-0,75	0,37	0,18
1981–2010	t, °С	-13,1	-12,5	-5,6	3,4	11,0	16,4	18,0	15,3	9,6	3,0	-6,0	-11,5	2,3
	КНЛТ t	-0,34	-0,17	1,01	-0,06	0,83	-0,25	0,13	0,52	0,50	0,64	1,09	-0,49	0,28
1991–2020	t, °С	-13,0	-12,0	-5,2	3,7	11,7	16,1	18,0	15,7	9,9	3,4	-5,6	-11,3	2,6
	КНЛТ t	-0,09	0,64	0,84	-0,07	0,43	-0,37	0,51	0,96	0,33	-0,28	0,78	0,71	0,37
1966–1990	R, мм	22,6	17,9	18,4	30,9	40,7	58,1	81,7	62,4	58,7	48,5	35,3	26,6	502,2
	КНЛТ R	2,26	0,91	-3,50	12,3	2,75	-4,49	2,63	-0,91	23,3	2,16	6,95	3,94	59,19
1981–2010	R, мм	27,2	23,1	21,4	29,9	51,2	64,5	71,2	68,2	58,9	49,2	38,4	30,1	533,3
	КНЛТ R	1,72	2,67	4,35	-3,33	8,84	1,44	-10,38	-5,32	-13,37	-5,17	1,95	1,40	-15,21
1991–2020	R, мм	25,9	22,5	24,5	29,6	54,9	64,4	74,5	71,9	49,6	51,8	35,8	30,3	535,7
	КНЛТ R	-4,29	0,23	1,73	5,11	3,36	-5,44	12,74	-1,32	0,26	0,65	-1,72	-2,87	8,47

Примечание. КНЛТ t (°С/10 лет), КНЛТ R (мм/10 лет). Цветом выделены статистически значимые тренды.

Note. The slope coefficient of the linear trend КНЛТ t (°С/10 years), КНЛТ R (mm/10 years). Statistically significant trends are highlighted in color

*Экология и природопользование**Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.*

Многолетняя динамика индекса Педя демонстрирует тенденцию к увеличению (0,26 ед./10 лет). Таким образом, летние условия смещаются в сторону большей засушливости [26].

При сравнении климатических норм в разные базовые периоды видно, что среднегодовые температуры воздуха имеют тенденцию к увеличению (табл. 1), что наглядно демонстрирует коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ). При этом, согласно [9], наибольший значимый рост средней годовой температуры наблюдается в последний тридцатилетний период (0,37 °С за десятилетие).

40 % территории лесного фонда геопарка занимают березовые леса, которые являются важной составляющей ландшафтов геопарка. Многие ключевые объекты геопарка включают березовые насаждения.

2010 г. в Республике Башкортостан отмечен как экстремально сухой и жаркий. Это привело к стремительному распространению инфекционного заболевания: бактериальной водянки березы. В результате были потеряны некоторые участки леса, что привело к снижению эстетичности территории геопарка (рис. 2). Кроме того, обостряется и вопрос безопасности туристских маршрутов, поскольку заболевшие деревья могут перегородить тропы или даже привести к травмам в случае падения.



Рис. 2. Березовый лес в районе с. Ахуново на космическом снимке программы World View 3: а – до заболевания бактериальной водянкой березы (2004 г.); б – после заболевания бактериальной водянкой березы (2014 г.)

Fig. 2. Birch forest near the village of Akhunovo in a World View 3 satellite image: а – before being infected with bacterial wetwood (2004); б – after being infected (2014)

Таким образом, для геопарка «Янган-Тау» крайне актуально оценить причины и факторы распространения бактериальной водянки березы.

Материалы и методы

Наземные исследования проводились с использованием даталоггеров температуры и влажности воздуха СЕМ-DT-171, Testo и VerigoPod.

Упакованный в контейнер даталоггер помещался в почву на глубину 15–20 см. Выбрано 10 участков на территории геопарка, где были размещены даталоггеры. На каждом участке размещалось 2 даталоггера разной марки для корректировки результатов. Исследования не показали значительных расхождений в результатах измерений даталоггеров разных производителей. Исследование началось в ноябре 2020 г. Раз в полгода проводится считывание данных с даталоггеров и замена батареек [23].

Основой для дистанционного анализа служили снимки Landsat 8–9 (OLI/TIRS C2 L1), включающие тепловые каналы – В10: 10,60–11,19 мкм; В11: 11,50–12,51 мкм.

Значения температуры, определённые по каналам 10 и 11 (они различаются охватываемыми интервалами теплового диапазона) Landsat 8–9, отличаются друг от друга на 1,5–3 °С. В ряде публикаций их предлагают усреднить [14].

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

Ряд исследований демонстрирует эффективность использования дистанционных методов, таких как визуальное дешифрирование и классификация поверхности, для выявления очагов бактериальной заболеваемости древостоя [3, 5]. Всего выявлено 12 наиболее выраженных очагов бактериальной водянки березы. Полученные результаты занесены в геоинформационный проект.

Для оценки взаимосвязи распространения бактериальной водянки березы и температурного режима верхнего слоя почвы было подобрано 36 безоблачных снимков Landsat 8–9 (OLI/TIRS C2 L1) и Landsat 4–5 (TM C2 L1) за период 2009–2022 гг. Для построения схемы градиента температуры почвы использовались снимки бесснежного периода (с мая по октябрь).

Поскольку температура не является единственным фактором окружающей среды, оказывающим влияние на состояние растительности и распространение инфекционных заболеваний, в работе учтены следующие показатели: увлажненность территории оценивалась по значению нормализованного дифференцированного водного индекса (Normalized Difference Water Index (NDWI)), влияние условий рельефа оценивалось через значения экспозиции и уклона.

NDWI является относительным и определяет количество влагозапаса в растительном покрове [13, 24]; рассчитывался с использованием тех же снимков Landsat, что и для температуры почвы по формуле (1) [24]:

$$NDWI = (NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR). \quad (1)$$

Для группировки Landsat 8–9 NIR соответствует каналу 5 (0,85–0,88 мкм), SWIR 2 – каналу 7 (2,11–2,29 мкм).

Значения этого индекса колеблются в диапазоне от -1 до 1. Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от -0,1 до 0,4. Считается, что водные объекты принимают значения от 0,2 до 1, объекты, не содержащие влагу, принимают значения меньше 0 [13].

Влияние условий рельефа оценивалось на основании экспозиции и значений показателей уклона. Соответствующие карты строились на основании данных SRTM в программе Q-GIS 3.14 (модуль «Морфометрический анализ»).

Описательная статистика проведена для всех указанных выше факторов по показателям пикселей, соответствующих местоположению здоровых и зараженных березовых насаждений. Растровая статистика получена с помощью встроенного в программу Q-GIS модуля SAGA GIS (инструмент «raster values to points»). Этот модуль сохраняет значения сетки в виде точек или многоугольников (мультиполигоны, где каждый отдельный полигон соответствует определенному пикселю).

Результаты исследования

Исследования научной группы Zhang и др. [36, 37] демонстрируют, что снежный покров обладает низкой теплопроводимостью и высоким альбедо и оказывает большое влияние на тепловой режим почвы [37]. Изоляция почвенного слоя снегом может вызывать значительные различия между температурой воздуха и температурой почвы. Для регионов с умеренным климатом отмечается значимое смещение между температурой почвы и температуры воздуха [36]. В этой связи в анализе использовались данные только для бесснежного периода.

По полученным данным со снимков и даталоггеров проведен регрессионный анализ. Проанализированы как весь ряд годовых результатов, так и результаты по сезонам. Как видно в табл. 2, в течение года наблюдается корреляция между результатами, полученными наземными измерениями, и данными со снимков Landsat 8–9 (OLI/TIRS C2 L1).

Наибольшая корреляция отмечена в осенний период (табл. 2).

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

Таблица 2

Взаимосвязи между результатами наземных исследований и спутниковыми данными
 The relationship between the results of ground-based research and satellite data

Период	Показатель		
	R	R ²	Стандартная ошибка
Весь год			
B10	0,84	0,71	3,80
B11	0,84	0,70	3,82
Среднее значение	0,84	0,71	3,80
Бесснежный период (май-октябрь)			
B10	0,84	0,71	2,35
B11	0,84	0,71	2,35
Среднее значение	0,84	0,71	2,35
Весна			
B10	0,76	0,58	4,10
B11	0,77	0,59	4,00
Среднее значение	0,77	0,59	4,00
Лето			
B10	0,55	0,31	1,75
B11	0,57	0,33	1,76
Среднее значение	0,57	0,32	1,75
Осень			
B10	0,96	0,93	1,15
B11	0,96	0,92	1,18
Среднее значение	0,96	0,93	1,16

Как видно из табл. 2, особых различий в корреляционных взаимосвязях между результатами наземных измерений и данных каналов B10, B11 и их среднего значения нет. В дальнейших исследованиях мы использовали среднее значение данных каналов B10 и B11.

Исходя из полученных данных, сформировано линейное уравнение (1):

$$T_{\text{почв}} = 3,06 + 0,28T_{\text{снимок}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{почв}}$ – температура почвы; $T_{\text{снимок}}$ – значение термодинамической температуры, полученной со снимков Landsat 8.

Более точные данные можно получить в осенний период, используя иные значения поправочных коэффициентов (2):

$$T_{\text{почв}} = 3,60 + 0,35T_{\text{снимок}}. \quad (2)$$

Для построения схемы температурного режима использовалась линейная зависимость температуры почвы от температуры поверхности по снимкам Landsat 8–9 и результатов измерений даталоггерами температуры почвы для бесснежного периода (рис. 3) (3):

$$T_{\text{почв}} = 3,40 + 0,30T_{\text{снимок}}. \quad (3)$$

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

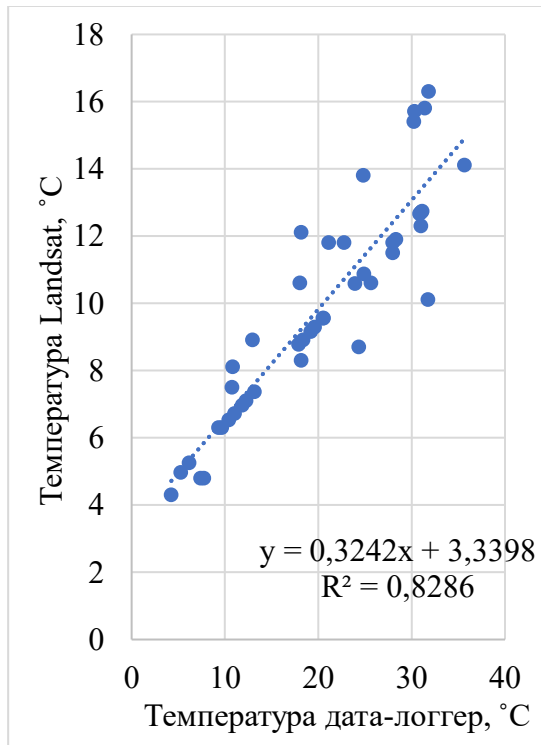


Рис. 3. Значения температур с данных даталоггеров и снимков Landsat 8–9 в бесснежный период (май-октябрь) 2020–2022 гг.
Fig. 3. Temperature values from data loggers and Landsat 8-9 images in the snowless period (May-October) 2020–2022

Сформирована схема распределения температурного режима поверхностного слоя почвы на основании усредненных значений температуры поверхности Земли, полученных со снимков Landsat 8–9 (OLI/TIRS C2 L1) и Landsat 4–5 (TM C2 L1) за период 2009–2022 гг., на которые наложены месторасположения очагов бактериальной водянки березы (рис. 4).

Далее, имея значения пикселей для здоровых и зараженных насаждений, оценены показатели описательной статистики для каждого из факторов.

Как видно из табл. 3 и рис. 4, зараженные насаждения больше располагаются на участках, средняя температура почвы которых составляет 9,6 °C, здоровые насаждения на менее прогреваемой территории – 7,8 °C. При этом, если обратить внимание на моду, то различия становятся еще больше – здоровые березовые насаждения – 7,6 °C, зараженные 10,2 °C. Отличаются и минимальные, и максимальные значения. Для зараженных насаждений они также выше – примерно на 1 °C.

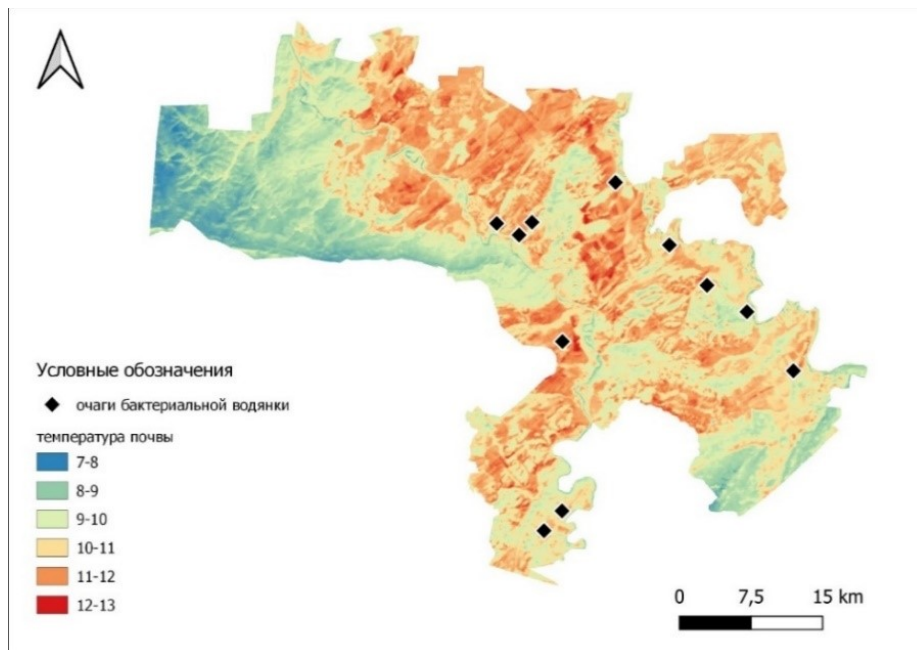


Рис. 4. Распределение температурного режима верхнего слоя почвы в глобальном геопарке ЮНЕСКО «Янган-Тау» и очаги бактериальной водянки березы
Fig. 4. Distribution of the topsoil temperature regime in the Yangan-Tau UNESCO Global Geopark and the foci of bacterial wetwood of birch

Экология и природопользование
 Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

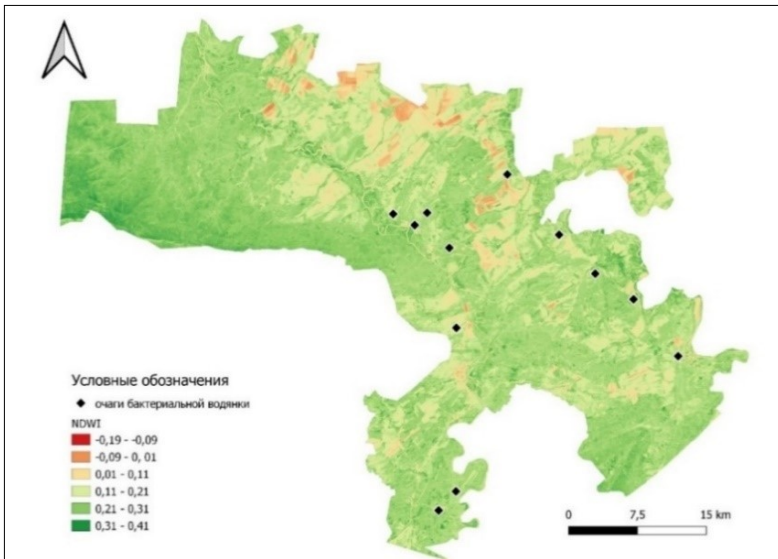


Рис. 5. Распределение NDWI в глобальном геопарке ЮНЕСКО «Янган-Тау» и очаги бактериальной водянки березы
 Fig. 5. Distribution of NDWI in the Yangan-Tau UNESCO Global Geopark and the foci of bacterial wetwood of birch

Увлажненность растительности оценена по данным NDWI (рис. 5). Среднее значение и мода NDWI для обоих типов березовых насаждений не имеют больших различий, вместе с тем здоровые березовые леса растут в более влажных условиях. Однако минимальные значения ниже у здоровых насаждений, нежели у зараженных.

Средние значения по экспозиции для обоих типов насаждений практически не отличаются, а вот исходя из значений моды следует, что зараженные березовые насаждения чаще расположены на юго-восточных склонах, здоровые – на северо-западных. Минимальные и максимальные значения больших отличий не имеют.

Средние значения уклона также не имеют значительных различий. Таким образом, можно предположить, что чаще распространение бактериальной водянки березы отмечается в более прогреваемых участках.

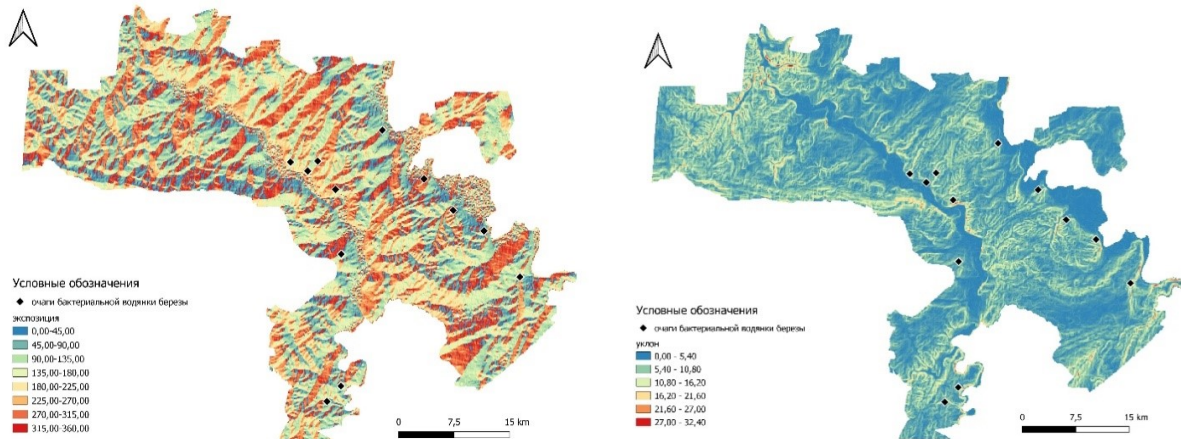


Рис. 6. Экспозиция и уклон поверхности в глобальном геопарке ЮНЕСКО «Янган-Тау»
 Fig. 6. Exposure and slope of the surface in the Yangan-Tau UNESCO Global Geopark

Таблица 3

Описательная статистика для здоровых насаждений и зараженных бактериальной водянкой березы
 Descriptive statistics for healthy stands and birch infected with bacterial wetwood

Анализируемый фактор	Показатель	Здоровые насаждения	Зараженные насаждения
Температура почвы	n	455528	5374
	Среднее	7,795	9,608
	Стандартная ошибка	0,002	0,006
	Медиана	7,697	9,578
	Мода	7,643	10,185
	Стандартное отклонение	0,396	0,403
	Минимум	6,998	8,769
	Максимум	10,351	11,010

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

Окончание табл. 3

Анализируемый фактор	Показатель	Здоровые насаждения	Зараженные насаждения
NDWI	n	455528	5374
	Среднее	0,263	0,229
	Стандартная ошибка	0,000	0,000
	Медиана	0,259	0,230
	Мода	0,243	0,213
	Стандартное отклонение	0,040	0,025
	Минимум	-0,063	0,060
	Максимум	0,410	0,332
Рельеф-экспозиция	n	145697	1827
	Среднее	176,395	173,032
	Стандартная ошибка	0,259	2,248
	Медиана	161,765	160,969
	Мода	313,247	134,735
	Стандартное отклонение	98,825	96,106
	Минимум	2,908	2,798
	Максимум	359,223	351,750
Рельеф-уклон	n	145697	1827
	Среднее	6,152	6,511
	Стандартная ошибка	0,015	0,077
	Медиана	5,437	5,872
	Мода	11,049	6,042
	Стандартное отклонение	3,727	3,275
	Минимум	0,203	0,788
	Максимум	34,030	17,899

Обсуждение

Общемировые тенденции, демонстрирующие увеличение среднегодовых температур, характерны для территории Республики Башкортостан и геопарка «Янган-Тау». Осредненный КНЛТ среднегодовых температур воздуха для Республики Башкортостан положительный и составляет 0,43 °C/10 лет [8], что несколько больше, чем для территории геопарка «Янган-Тау» (0,37 °C/10 лет). Также для геопарка, как и для Предуралья (западная часть Республики Башкортостан), характерно увеличение засушливости.

Влияние средней дневной температуры на вегетационную активность растительности доказано многими исследованиями на примере сопоставления вегетационных индексов (например, NDVI) и среднегодовых температур воздуха [22, 11] или температуры поверхности Земли [32]. Данный показатель напрямую коррелирует с продуктивностью растительности. Исследования, проведенные для природного парка «Кандры-Куль» (Республика Башкортостан), демонстрируют снижение продуктивности березовых древостоев на 60 % в результате распространения бактериальной водянки березы [34]. Таким образом, данная связь тоже может проявляться с вегетационным индексом, и зараженный древостой будет иметь низкие значения NDVI.

Вместе с тем возможен и обратный эффект, когда структура растительности влияет на температуры почвы. В исследованиях Н. Воропай и др. [6, 7] на примере Тункинской долины показано, что на участках с нарушенной растительностью почвенный покров больше прогревается и наблюдается таяние вечной мерзлоты. Рассматривая результаты нашего исследования, можно также констатировать, что большему прогреванию подвержены антропогенно-измененные территории: населенные пункты и пашни. Также чаще проявления бактериальной водянки березы были зафиксированы на территориях, измененных в результате человеческой деятельности – вблизи населённых пунктов, по маршрутам выпаса скота и пр.

*Экология и природопользование**Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.*

Увлажненность территории также оказывает влияние на продуктивность растительности, которая в свою очередь определяется санитарным состоянием древостоев. Для территории Республики Беларусь выявлено, что более значимым фактором, влияющим на значение NDVI, является количество осадков в вегетационный период [11]. Однако на долгопериодные изменения вегетационного индекса влияет потепление воздуха при практически неизменном количестве осадков. Наше исследование охватило период в 13 лет и также продемонстрировало влияние температурного режима на древостой березы.

Для Республики Башкортостан Н.И. Федоровым и др. (2022) [18] проведено исследование влияния климата и рельефа на распространение лесных сообществ. Территория геопарка «Янган-Тау» относится к Уфимскому плато, для которого выявлено, что крутизна и экспозиция оказывают большее влияние на структуру растительности, чем для горно-лесной зоны. Тем не менее показано, что температура и осадки оказывают более значимое влияние на лесные растительные сообщества как на территории Уфимского плато, так и в горно-лесной зоне. Наши результаты также согласуются с данным исследованием. Температура поверхностного слоя почвы месторасположения здоровых древостоев отличается от температуры зараженных более чем на 1 °С. Влияние рельефа проявляется в преимущественном расположении зараженных древостоев на юго-восточных склонах.

Заключение

Распространение заболеваний древостоя в условиях глобального изменения климата является серьезной проблемой для многих регионов планеты.

В России и Республике Башкортостан после аномально жаркого и сухого лета 2010 г. получило распространение инфекционное заболевание березовых лесов – бактериальная водянка. Особенно актуальна данная проблема для глобального геопарка ЮНЕСКО «Янган-Тау», в котором березовые леса являются одной из основных составляющих его ландшафта.

Общий анализ изменения температурно-влажностного режима территории геопарка «Янган-Тау», по данным метеостанции Дуван, показал тренды к аридизации климата.

Многие исследования показывают большее влияние температуры почвы на продуктивность растительности, чем температуры воздуха. Использование даталоггеров температуры для корректировки данных спутниковых снимков Landsat 4–5 и 8–9 позволило картировать среднее распределение температур поверхностного слоя почвы для бесснежного периода на территории геопарка «Янган-Тау».

Соотнесение карты температур поверхностного слоя почвы с очагами бактериальной водянки березы наглядно показало связь распространения данного заболевания с прогреваемостью почвы. Таким образом, выявлены участки, где риск распространения бактериальной водянки березы намного выше. Данная информация может быть использована для формирования стратегии адаптации к глобальному изменению климата геопарка «Янган-Тау» и обеспечению устойчивого лесопользования на территории Салаватского лесничества.

Библиографический список

1. Байтурина Р.Р., Габделхаков А.К., Халикова О.В., Рахматуллин З.З., Тимерьянов А.Ш. Влияние изменений климата на лесные ресурсы Республики Башкортостан // Лесотехнический журнал. 2020. № 4. С. 99–109. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/8
2. Бондаренко-Борисова И.В. Бактериальная водянка – опасное заболевание березы в Донецком регионе // Промышленная ботаника. 2020. Вып. 20, № 2. С. 62–65.
3. Волков А.М., Гарипова С.Р., Данилов Д.О. Изучение распространения бактериальной водянки березы в природном парке «Аслы-Куль» методом визуального дешифрирования космических снимков // Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. трудов по матер. 7-й Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием, Саратов, 8–10 апреля 2015 года. Саратов: Саратовский государственный университет им. Гагарина Ю.А., 2015. С. 316–318.
4. Волков А.М., Яруллина И.Н., Сагитов Ш.З. Изменение климата на территории Республики Башкортостан: тенденции и последствия для биоты // Башкирский экологический вестник. 2013. № 3–4. С. 46–48.
5. Воронин В.В., Софронов А.П., Морозова Т.И., Осолков В.А., Суховольский В.Г., Ковалёв А.В. Ландшафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 56–65. doi: 10.21782/gipr0206-1619-2019-4(56-65)

Экология и природопользование

Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

6. Вороний Н.Н., Атутова Ж.В., Шуклина Е.С. Многолетняя динамика температуры почвы пирогенно трансформированных геосистем Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2022. Т. 43, № 2. С. 132–145. doi: 10.15372/GIPR20220214.
7. Вороний Н.Н., Киселев М.В., Черкашина А.А. Мониторинг температуры почв на многолетнемёрзлых породах в естественных и антропогенно нарушенных условиях Тункинской котловины // Лёд и снег. 2019. Т. 59, № 4. С. 517–528. doi: 10.15356/2076-6734-2019-4-421.
8. Галимова Р.Г. Анализ изменений температурно-влажностного режима на территории Республики Башкортостан в современный период // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, № 1. С. 83–93. doi: 10.35634/2412-9518-2020-30-1-83-93.
9. Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Богдан Е.А. Климат геопарка «Янган-Тау» и его современный изменения // Динамика и взаимодействие геосфер Земли: матер. Всерос. конф. с межд. участ., посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. Т. II, Томск, 8–12 ноября 2021 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2021. С. 134–137.
10. Куулар Х.Б. Температура ландшафтной поверхности Республики Тыва по данным спутника Landsat-8 в зимний период 2014–2017 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 67–77.
11. Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исследования Земли из Космоса. 2019. № 6. С. 77–88.
12. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Чубаров Д.Л. Построение температурных карт города Новосибирска на основе данных спутника LANDSAT 8 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 52–59.
13. Паниди Е.А., Рыкин И.С., Целев В.Ю. О проблеме определения временных границ вегетационных сезонов по данным наземных наблюдений и дистанционного зондирования // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 129–140. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-129-140
14. Силкин К. Коррекция материалов Landsat [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html> (дата обращения 20.06.2023).
15. Сингатуллин И.К. Состояние осинников Республики Татарстан после засухи 2010 года // Вестник Казанского ГАУ. 2016. № 3 (41). С. 40–45. doi: 10.12737/22674
16. Татаринцев А.И., Скрипальщикова Л.Н. Эколого-фитопатологическое состояние березняков на территории красноярской группы районов // Сибирский лесной журнал. 2015. № 2. С. 8–19.
17. Татаринцев А.И. Эколого-ценотические особенности пораженности березняков бактериальной водяной березы (Красноярская группа) // Сибирский экологический журнал. 2014. № 2. С. 273–281.
18. Федоров Н.И., Жигунова С.Н., Мартыненко В.Б., Широких П.С., Михайленко О.И. Влияние климата и рельефа на распространение лесных сообществ в разных ботанико-географических районах Южно-Уральского региона // Экология. 2022. № 6. С. 411–420. doi: 10.31857/S036705972206004X
19. Федоров Н.И., Мартыненко В.Б., Жигунова С.Н., Михайленко О.И., Шендель Г.В., Наумова Л.Г. Изменение распространения широколиственных древесных видов в центральной части Южного Урала со второй половины XX в. // Экология. 2021. № 2. С. 103–111. doi: 10.31857/S0367059721020050
20. Alizadeh M. Bacterial Wetwood Disease. // Journal of Plant Chemistry and Ecophysiology. 2017. Vol. 2(1). P. 1015.
21. Alizadeh M., Khakvar R., Babai-Ahari A. Isolation and characterization of bacterial agents associated of wetwood disease on Elm trees in Iran // Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica. 2017. Vol. 52. P. 1–11. doi: 10.1556/038.52.2017.028.
22. Barbosa H.A., Huete A.R., Baethgen W.E. A 20-year study of NDVI variability over the northeast region of Brazil // Arid environment. 2006. Vol. 67. P. 288–307.
23. Bogdan E., Volkov A., Belan L., Kamalova R., Tuktarova I. Remote Assessment of Soil Temperature on the Example of a Carbon Landfill Site of the Republic of Bashkortostan (Yangan-Tau Geopark) // In Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development. 2022. Vol. 1. P. 215–221. doi: 10.5220/0011568800003524
24. Chai L., Jiang H., Liu S. Estimating Corn Canopy Water Content from Normalized Difference Water Index (NDWI): An Optimized NDWI-Based Scheme and Its Feasibility for Retrieving Corn VWC // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021. Vol. 59, No. 10. P. 8168–8181. doi: 10.1109/TGRS.2020.3041039
25. El Garouani M., Amyay M., Lahrach A., Oulidi H.J. Land Surface Temperature in Response to Land Use/Cover Change Based on Remote Sensing Data and GIS Techniques: Application to Saiss Plain, Morocco // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22, № 7. P. 100–112. doi: 10.12911/22998993/139065.
26. Galimova R., Silantyev K. The analysis of the long-term dynamic of the amount of atmospheric precipitation on the territory of the republic of Bashkortostan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: VII International Scientific Practical Conference «Modern problems of reservoirs and their catchments». 2019. Vol. 321. P. 12–20.
27. Goychuk A., Drozda V., Shvets M., Kulbansk I. Bacterial wetwood of silver birch (*Betula pendula* roth): symptomatology, etiology and pathogenesis // Folia Forestalia Polonica. 2020. Vol. 62. P. 145–159. doi: 10.2478/ffp-2020-0015.
28. Hamdi S., Moyano F., Sall S., Bernoux M., Chevallier T. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 58. P. 115–126. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.11.012
29. Jentsch A., Beierkuhnlein C. Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems // Comptes Rendus – Geoscience. 2008. Vol. 340, № 9–10. P. 621–628. doi: 10.1016/j.crte.2008.07.002
30. Kravchenko I.K., Tikhonova E.N., Ulanova R.V., Menko E.V., Sukhacheva M.V. Effect of temperature on litter decomposition, soil microbial community structure and biomass in a mixed-wood forest in European Russia // Current Science. 2019. Vol. 116, № 5. P. 765–772. doi: 10.18520/cs/v116/i5/765-772
31. Larjavaara M., Lu X., Chen X., Vastaranta M. Impact of rising temperatures on the biomass of humid old – growth forests of the world // Carbon Balance and Management. Springer International Publishing. 2021. Vol. 31, № 16. P. 1–9. doi: 10.1186/s13021-021-00194-3

Экология и природопользование

Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

32. Reynolds M., Comiso J., Balsler A., Verbyla D. Relationship between satellite derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI. // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. P. 1884–1894. doi: 10.1016/j.rse.2007.09.008
33. Thuiller W., Albert C., Araujo M., Berry P., Cabeza M., Guisan A., Hickler T., Midgely G., Paterson J., Schurr F., Sykes M., Zimmermann N. Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 2008. Vol. 9, № 3–4. P. 137–152. doi: 10.1016/j.ppees.2007.09.004.
34. Volkov A., Belan L., Bogdan E., Suleymanov A., Tuktartova I., Shagaliev R., Muftakhina D. Spatio-Temporal Analysis of forest growing stock volume and carbon stocks: a case study of Kandry-Kul natural park, Russia // *Land*. 2023. No. 12(7). P. 1441. doi: 10.3390/land12071441
35. Yuste J., Baldocchi D., Gershenson A., Goldstein A., Misson L., Wong S. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture // *Global Change Biology*. 2007. Vol. 13. P. 2018–2035. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01415.
36. Zhang Y., Sherstiukov A.B., Qian B., Kokelj S.V., Lantz T.C. Impacts of snow on soil temperature observed across the circum-polar north // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. P. 044012. doi: 10.1088/1748-9326/aab1e7.
37. Zhang Y., Wang S., Barr A.G., Black T. Impact of snow cover on soil temperature and its simulation in a boreal aspen forest // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. Vol. 52. P. 355–370. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.07.001.

References

1. Bajturina R.R., Gabdelxakov A.K., Xalikova O.V., Raxmatullin Z.Z., Timer'yanov A.Sh. (2020) Vliyaniye izmenenij klimata na lesny'e resursy' Respubliki Bashkortostan [The impact of climate change on the forest resources of the Republic of Bashkortostan]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, no. 4, pp. 99–109. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/8 [In Russian]
2. Bondarenko-Borisova I.V. (2020) Bakterial'naya vodyanka – opasnoe zabolevaniye berezy' v Doneczkom regione [Bacterial wetwood is a dangerous disease of birch in the Donetsk region]. *Promy'shlennaya botanika*, no. 20(2), pp. 62–65. [In Russian]
3. Volkov A.M., Garipova S.R., Danilov D.O. (2015) Izuchenie rasprostraneniya bakterial'noj vodyanki berezy' v prirodnom parke «Asly'-Kul» metodom vizual'nogo deshifirovaniya kosmicheskix snimkov [Study of the spread of bacterial wetwood of birch in the Asly-Kul Nature Park by the method of visual interpretation of satellite images]. *E'kologicheskie problemy' promy'shlenny'x gorodov: sb. nauch. trudov po mater. 7-j Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhd. Uchastiem*. Saratov: Saratovskij gosudarstvenny'j universitet im. Gagarina Yu.A., pp. 316–318. [In Russian]
4. Volkov A.M., Yarullina I.N., Sagitov Sh.Z. (2013) Izmeneniye klimata na territorii Respubliki Bashkortostan: tendencii i posledstviya dlya bioty' [Climate change in the Republic of Bashkortostan: trends and consequences for biota]. *Bashkirskij e'kologicheskij vestnik*, no. 3–4, pp. 46–48. [In Russian]
5. Voronin V.B., Sofronov A.P., Morozova T.I., Oskolkov V.A., Suxovol'skij V.G., Kovalyov A.V. (2019) Landshaftnaya priurochennost' bakterial'ny'x boleznej temnoxvojny'x lesov xrebita Xamar-Daban (Yuzhnoe Pribajkal'e) [Landscape occurrence of bacterial diseases of dark coniferous forests of the Xamar-Daban ridge (Southern Baikal region)]. *Geografiya i prirodny'e resursy'*, no. 4, pp. 56–65. doi: 10.21782/gipr0206-1619-2019-4(56-65). [In Russian]
6. Voropaj N.N., Atutova Zh.V., Shuklina E.S. (2022) Mnogoletnyaya dinamika temperatury' pochvy' pirogenno transformirovanny'x geosistem Tunkinskoj kotloviny' (Yugo-Zapadnoe Pribajkal'e) [Long-term soil temperature dynamics in pyrogenically transformed geosystems of the Tunka Depression (Southwestern Cisbaikalia)]. *Geografiya i prirodny'e resursy'*, no. 43(2), pp. 132–145. doi: 10.15372/GIPR20220214. [In Russian]
7. Voropaj N.N., Kiselev M.V., Cherkashina A.A. (2019) Monitoring temperatury' pochv na mnogoletnemyorzly'x porodax v estestvenny'x i antropogenno narushenny'x usloviyax Tunkinskoj kotloviny' [Monitoring of soil temperature on permafrost in natural and anthropogenic disturbed conditions in the Tunkinskaya Depression]. *Lyod i sneg*, no. 59(4), pp. 517–528. doi: 10.15356/2076-6734-2019-4-421. [In Russian]
8. Galimova R.G. (2020) Analiz izmenenij temperaturno-vlazhnostnogo rezhima na territorii Respubliki Bashkortostan v sovremenny'j period [Analysis of changes in the temperature and humidity regime on the territory of the Republic of Bashkortostan in the modern period]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, no. 30(1), pp. 83–93. doi: 10.35634/2412-9518-2020-30-1-83-93. [In Russian]
9. Kamalova R.G., Belan L.N., Bogdan E.A. (2021) Klimat geoparka «Yangan-Tau» i ego sovremenny'j izmeneniya [The climate of the Yangan-Tau UNESCO geopark and its modern changes]. *Dinamika i vzaimodejstvie geosfer Zemli: mater. Vseros. konf. s mezhd. uchast., posvyashhennoj 100-letiyu podgotovki v Tomskom gosudarstvennom universitete specialistov v oblasti nauk o Zemle*. T. II, Tomsk, 8–12 noyabrya 2021 g. Tomsk: Izd-vo Tomskogo CzNTI, pp. 134–137. [In Russian]
10. Kuular X.B. (2018) Temperatura landshaftnoj poverxnosti Respubliki Ty'va po danny'm sputnika Landsat-8 v zimnij period 2014–2017 gg [Land surface temperature in the Tyva Republic in the winters of 2014–2017 by Landsat-8 data]. *Sovremennyye problemy' distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, no. 15(7), pp. 67–77. [In Russian]
11. Ly'senko S.A. (2019) Klimatoobuslovlenny'e izmeneniya bioproduktivnosti nazemny'x e'kosistem Belarusi [Climate-conditioned changes in the bioproductivity of terrestrial ecosystems of Belarus]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, no. 6, pp. 77–88. [In Russian]
12. Mamash E.A., Pestunov I.A., Chubarov D.L. (2021) Postroeniye temperaturny'x kart goroda Novosibirsk na osnove danny'x sputnika LANDSAT 8. [Building of temperature maps of Novosibirsk city based on Landsat 8 data]. *Intere'kspo Geo-Sibir'*, no. 4(1), pp. 52–59. [In Russian]
13. Panidi E.A., Ry'kin I.S., Cepelev V.Yu. (2018) O probleme opredeleniya vremenny'x granicz vegetacionny'x sezonov po danny'm nazemny'x nablyudenij i distancionnogo zondirovaniya [On the problem of determining the time limits of vegetation seasons based on ground-based observations and remote sensing] *InterKarto*. InterGIS, vol. 24, no 2, pp. 129–140. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-129-140 [In Russian]
14. Silkin K. Korrekciya materialov Landsat, available at <https://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html> (Accessed 20.06.2023). [In Russian]

Экология и природопользование

Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

15. Singatullin I.K. (2016) Sostoyanie osinnikov Respubliki Tatarstan posle zasuxi 2010 godavv [The state of the aspen trees of the Republic of Tatarstan after the drought of 2010]. *Vestnik Kazanskogo GAU*, no. 3(41), pp. 40–45. doi: 10.12737/22674. [In Russian]
16. Tatarincev A.I., Skripal'shnikova L.N. (2015) E'kologo-fitopatologicheskoe sostoyanie bereznyakov na territorii krasnoyarskoj gruppy' rajonov [Ecological and phytopathological condition of birch forests on the territory of the Krasnoyarsk group of districts]. *Sibirskij lesnoj zhurnal*, no. 2, pp. 8–19. [In Russian]
17. Tatarincev A.I. (2014) E'kologo-cenoticheskie osobennosti porazhennosti bereznyakov bakterial'noj vodyankoj berezy' (Krasnoyarskaya gruppa) [Ecological and cenotic features of birch trees affected by bacterial dropsy of birch (Krasnoyarsk group)]. *Sibirskij e'kologicheskij zhurnal*, no. 2, pp. 273–281. [In Russian]
18. Fedorov N.I., Zhigunova S.N., Marty'nenko V.B., Shirokix P.S., Mixajlenko O.I. (2022) Vliyanie klimata i rel'efa na rasprostranenie lesny'x soobshhestv v razny'x botaniko-geograficheskix rajonax Yuzhno-Ural'skogo regiona [The influence of climate and relief on the distribution of forest communities in different botanical and geographical areas of the South Ural region]. *E'kologiya*, no 6, pp. 411–420. doi: 10.31857/S036705972206004X [In Russian]
19. Fedorov N.I., Marty'nenko V.B., Zhigunova S.N., Mixajlenko O.I., Shendel' G.V., Naumova L.G. (2021) Izmenenie rasprostraneniya shirokolistvenny'x drevesny'x vidov v central'noj chasti Yuzhnogo Urala so vtoroj poloviny' XX v. [Changes in the distribution of broad-leaved tree species in the central part of the Southern Urals since the second half of the twentieth century.]. *E'kologiya*, no. 2, pp. 103–111. doi: 10.31857/S0367059721020050/ [In Russian]
20. Alizadeh M. (2017) Bacterial Wetwood Disease. *Journal of Plant Chemistry and Ecophysiology*, no. 2(1), P. 1015.
21. Alizadeh M., Khakvar R., Babai-Ahari A. (2017). Isolation and characterization of bacterial agents associated of wetwood disease on Elm trees in Iran. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, no. 52, pp. 1–11. doi: 10.1556/038.52.2017.028.
22. Barbosa H.A., Huete A.R., Baethgen W.E. (2006) A 20-year study of NDVI variability over the northeast region of Brazil. *Arid environment*, no. 67, pp. 288–307.
23. Bogdan E., Volkov A., Belan L., Kamalova R., Tuktarova I. (2022) Remote Assessment of Soil Temperature on the Example of a Carbon Landfill Site of the Republic of Bashkortostan (Yangan-Tau Geopark). *In Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development*, no. 1, pp. 215–221. doi: 10.5220/0011568800003524
24. Chai L., Jiang H., Liu S. (2021) Estimating Corn Canopy Water Content from Normalized Difference Water Index (NDWI): An Optimized NDWI-Based Scheme and Its Feasibility for Retrieving Corn VWC. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 10, pp. 8168–8181. doi: 10.1109/TGRS.2020.3041039
25. El Garouani M., Amyay Mh., Lahrach A., Oulidi H.J. (2021) Land Surface Temperature in Response to Land Use/Cover Change Based on Remote Sensing Data and GIS Techniques: Application to Saïss Plain, Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, no. 22(7), pp. 100–112. doi: 10.12911/22998993/139065.
26. Galimova R., Silant'yev K. (2019) The analysis of the long-term dynamic of the amount of atmospheric precipitation on the territory of the republic of Bashkortostan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: VII International Scientific Practical Conference «Modern problems of reservoirs and their catchments»*, no. 321, P. 12–20.
27. Goychuk A., Drozda V., Shvets M., Kulbansk I. (2020) Bacterial wetwood of silver birch (*Betula pendula* roth): symptomatology, etiology and pathogenesis. *Folia Forestalia Polonica*, no. 62, pp. 145–159. doi: 10.2478/ffp-2020-0015.
28. Hamdi S., Moyano F., Sall S., Bernoux M., Chevallier T. (2013) Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, no. 58, pp. 115–126. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.11.012
29. Jentsch A., Beierkuhnlein C. (2008) Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus – Geoscience*, no. 340(9–10), pp. 621–628. doi: 10.1016/j.crte.2008.07.002
30. Kravchenko I.K., Tikhonova E.N., Ulanova R.V., Menko E.V., Sukhacheva M.V. (2019) Effect of temperature on litter decomposition, soil microbial community structure and biomass in a mixed-wood forest in European Russia. *Current Science*, no. 116(5), pp. 765–772. doi: 10.18520/cs/v116/i5/765-772
31. Larjavaara M., Lu X., Chen X., Vastaranta M. (2021) Impact of rising temperatures on the biomass of humid old - growth forests of the world. *Carbon Balance and Management. Springer International Publishing*, no. 31(16), pp. 1–9. doi: 10.1186/s13021-021-00194-3
32. Reynolds M., Comiso J., Balsler A., Verbyla D. (2008) Relationship between satellitederived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI. *Remote Sensing of Enviroment*, vol. 112, pp. 1884–1894. doi: 10.1016/j.rse.2007.09.008
33. Thuiller W., Albert C., Araujo M., Berry P., Cabeza M., Guisan A., Hickler T., Midgely G., Paterson J., Schurr F., Sykes M., Zimmermann N. (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, no. 9(3–4), pp. 137–152. doi: 10.1016/j.ppees.2007.09.004.
34. Volkov A., Belan L., Bogdan E., Suleymanov A., Tuktarova I., Shagaliev R., Muftakhina D. (2023) Spatio-Temporal Analysis of Forest Growing Stock Volume and Carbon Stocks: A Case Study of Kandry-Kul Natural Park, Russia. *Land*. no 12(7), pp. 1441. doi: 10.3390/land12071441
35. Yuste J., Baldocchi D., Gershenson A., Goldstein A., Misson L., Wong S. (2007) Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biology*, no. 13, pp. 2018–2035. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01415.
36. Zhang Y., Sherstiukov A.B., Qian B., Kokelj S.V., Lantz T.C. (2018) Impacts of snow on soil temperature observed across the circum-polar north. *Environmental Research Letters*, no. 13, pp. 044012. doi: 10.1088/1748-9326/aab1e7.
37. Zhang Y., Wang S., Barr A.G., Black T. (2008) Impact of snow cover on soil temperature and its simulation in a boreal aspen forest. *Cold Regions Science and Technology*, no. 52, pp. 355–370. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.07.001.

Экология и природопользование
Богдан Е.А., Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Туктарова И.О.

Статья поступила в редакцию: 27.06.23, одобрена после рецензирования: 15.11.2023, принята к опубликованию: 14.03.2024.

The article was submitted: 27 June 2023; approved after review: 15 November 2023; accepted for publication: 14 March 2024.

Информация об авторах

Information about the authors

Екатерина Александровна Богдан

кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем, Уфимский государственный нефтяной технический университет;

450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

Ekaterina A. Bogdan

Candidate of Economic Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University;

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

e-mail: eavolkova@bk.ru

Рита Галимьяновна Камалова

старший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Центра технологий декарбонизации, Уфимский государственный нефтяной технический университет;

450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

Rita G. Kamalova

Senior Researcher, Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University;

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

e-mail: galim-rita@yandex.ru

Лариса Николаевна Белан

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры охраны окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, Уфимский государственный нефтяной технический университет;

450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

Larisa N. Belan

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Department of Environmental Protection and Prudent Exploitation of Natural Resources, Ufa State Petroleum Technological University;

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

e-mail: Belan77767@mail.ru

Ирэн Ольвертовна Туктарова

кандидат технических наук, заведующая кафедрой охраны окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, Уфимский государственный нефтяной технический университет;

450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

Iren O. Tuktarova

Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department of Environmental Protection and Prudent Exploitation of Natural Resources, Ufa State Petroleum Technological University;

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

e-mail: umrko@mail.ru

Вклад авторов

Богдан Е.А. – идея, сбор материала, обработка, анализ и визуализация полевых данных и данных спутниковой съемки, написание статьи.

Камалова Р.Г. – идея, систематизация и обработка материала, анализ полученных данных, написание статьи.

Белан Л.Н. – идея, написание статьи.

Туктарова И.О. – научное редактирование текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Ekaterina A. Bogdan – the idea; collection, processing and visualization of field data and remote sensing data; writing of the article.

Rita G. Kamalova – the idea; collection of material; data processing; writing of the article.

Larisa N. Belan – the idea; writing of the article.

Iren O. Tuktarova – scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.