

## Динамика температуры поверхности Новосибирской области по данным дистанционного зондирования в XXI веке

*П. В. Воронина<sup>1, 2\*</sup>*

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: pol.voronina@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты изучения динамики температуры поверхности Новосибирской области в XXI веке по данным дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS для исследования температурного режима, выявления его особенностей. Проведен анализ полученных после обработки спутниковых снимков пространственно-временных рядов поверхностных температур для различных временных интервалов.

**Ключевые слова:** MODIS, обработка спутниковых данных, температура поверхности, картографическое моделирование почв

## The Land Surface Temperature Dynamics of the Novosibirsk Region from Remote Sensing Data in XXI Century

*P. V. Voronina<sup>1, 2\*</sup>*

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: pol.voronina@gmail.com

**Abstract.** The results of the study of the land surface temperature regime of the Novosibirsk region in the 21st century based on remote sensing data are presented. The analysis of space-time series of surface temperatures obtained after processing satellite images for various time intervals was carried out.

**Keywords:** MODIS, satellite remote sensing data processing, Land Surface Temperature (LST), statistical deviations, soil cartographic modeling

### *Введение*

Температура поверхности земли имеет важное значение при исследовании региональных и глобальных изменений климата [1]. Она может выполнять роль индикатора климатических перемен [2]. Динамика такой температуры позволяет выделить уникальные климатические особенности регионального почвенного климата, определить возможности сельскохозяйственного и промышленного использования территорий региона [3–6]. Для изучения температуры поверхности одним из источников информации могут выступать данные дистанционного космического зондирования (ДЗ) среднего пространственного разрешения в тепловом инфракрасном диапазоне [7–9]. В качестве таких данных выступают, например, снимки, полученные с помощью спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Terra. Регулярность съёмки, значительный охват порой весьма труднодоступной территории составляет несомненное достоинство ис-

пользования ДДЗ среднего пространственного разрешения [10, 11]. Однако наряду с указанным преимуществом исследователь неизбежно сталкивается и с трудностями их применения, связанными с необходимостью проведения пространственно-временного анализа спутниковых измерений для больших территорий и за достаточно продолжительный временной период.

Целью представляемой работы является анализ динамики температурных полей поверхности земли в границах Новосибирской области (НСО) по данным дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS для исследования температурного режима, выявления его особенностей. С этой целью проведен анализ полученных после обработки спутниковых снимков пространственно-временных рядов температур для различных временных интервалов, в том числе, и их агрегация. Среднегодовая температура поверхности Земли является простейшим метеорологическим индикатором, в котором, как в фокусе, отражены важнейшие физические процессы, происходящие в атмосфере и в почве. Таким образом, среднегодовая поверхностная температура становится важным показателем особенностей почвенного климата и взаимодействия двух взаимопроникающих сред – почвенной и растительной.

### *Характеристика территории исследования*

Новосибирская область располагается в центре России в глубине обширного евразийского континента на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Площадь территории области 177,76 тыс. км<sup>2</sup>. Протяжённость с запада на восток – 642 км, с севера на юг – 444 км, располагается между 54°44' и 57°12' с. ш. в зонах южной тайги, смешанных лесов и лесостепи (рис. 1). Долина р. Обь разделяет область на две неравные части, из которых наибольшая (западная или Левобережная) представляет однородную равнину, ее площадь около 80 % территории, меньшая (восточная или Правобережная) – всхолмлённые возвышения с определённым ростом высот в восточном и особенно в юго-восточном направлениях.

Климат Новосибирской области определяется как суровый с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом. Суровость климата главным образом вызывается особенностями погодного режима в зимний период. Строение рельефа внутренних районов области и подстилающей поверхности формируют местные климато-экологические различия, которые выражаются в характере растительности, снежного и почвенного покровов, густоте водной сети и т. д. [12–14].

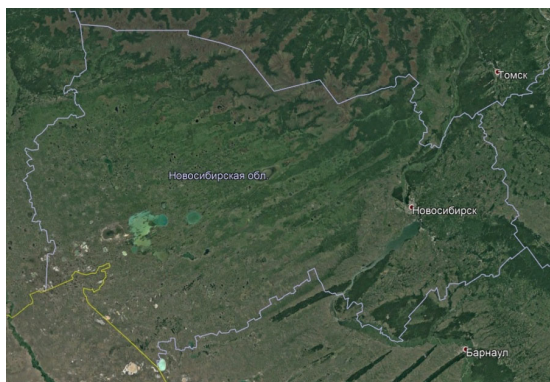


Рис. 1. Новосибирская область – территория исследования (Google Earth Pro)

## *Материалы исследования*

В отличие от предыдущих работ автора [15, 16], в которых использовалась обеспечивающая виртуальную интеграцию содержащихся в архиве данных в реляционной СУБД технология hVault, в настоящей работе спутниковая информация отбирается и обрабатывается средствами Google Earth Engine (GEE) [17] – облачной платформы для геопространственного анализа больших данных, обеспечивающей доступ к большой базе данных спутниковых изображений и к вычислительным ресурсам, необходимым для их анализа.

Поставленная задача решалась с использованием продуктов, получаемых в результате обработки данных приборов Terra/MODIS. В этих продуктах значения температуры восстанавливаются с помощью алгоритма [18] по измерениям интенсивности инфракрасного излучения, регистрируемого в каналах 31 (10.78-11.28 мкм) и 32 (11.77-12.27 12 мкм) (продукты MOD11A1).

Анализ пространственно-временных рядов температуры поверхности территории Новосибирской области проведен по рассчитанным средним значениям температуры в точке, измеренной в ночное и дневное время, для каждого календарного года с 2000 по 2021 гг. Область исследования ограничена территорией Новосибирской области.

## *Обсуждение результатов*

Среднегодовая температура поверхности Земли является метеорологическим параметром, отражающим особенности теплообмена на протяжении года, зависит от интенсивности солнечной радиации, особенностей циркуляции атмосферы и физических характеристик почвенного покрова. На рис. 2 показана динамика среднегодовой температуры поверхности земли в Новосибирской области с 2000 по 2021 гг. по ночным и дневным данным. Отметим, что среднегодовая температура поверхности Новосибирской области изменялась от  $-1.5^{\circ}\text{C}$  до  $5.4^{\circ}\text{C}$ . Для «обычного» года температуры варьируются от  $0.7^{\circ}\text{C}$  до  $2.8^{\circ}\text{C}$ . Выделяются как самые теплые 2000 г. и 2020 г. со среднегодовой температурой  $4.4^{\circ}\text{C}$  и  $5.4^{\circ}\text{C}$  соответственно. Самыми холодными годами можно назвать 2004 и 2006, в которые средняя температура была хоть и низкой,  $0.2^{\circ}\text{C}$ , но все же положительной, а вот в течение четырех лет подряд с 2009 по 2012 гг. средняя температура была ниже нулевой отметки:  $-0.6^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.8^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.3^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.1^{\circ}\text{C}$ . Холодным в целом был и 2018 г. со среднегодовой температурой поверхности  $-1.5^{\circ}\text{C}$ . Отмечается, что самым холодным за последние два десятилетия был 2010 г. Это подтверждается и данными станций Гидрометслужбы [13].

Для более информативного понимания разброса значений температур поверхности земли на рис. 3 изображены графики минимальной и максимальной средних температур по данным ночных и дневных измерений, полученные по продуктам Terra/ MODIS с 2000 по 2021 гг. Эти графики показывают, что самая низкая минимальная средняя ночная температура зафиксирована в 2009 ( $-14.2^{\circ}\text{C}$ ), 2010 ( $-16^{\circ}\text{C}$ ), 2012 ( $-13.9^{\circ}\text{C}$ ) и 2018 ( $-12.7^{\circ}\text{C}$ ) гг., а самая высокая максимальная дневная – в 2010 ( $24.2^{\circ}\text{C}$ ), 2011 ( $23^{\circ}\text{C}$ ) и 2012 ( $24.3^{\circ}\text{C}$ ) гг. В целом,

годы с 2009 по 2012 были самыми холодными (рис. 2), т.е. несмотря на высокие показатели средней дневной температуры поверхности по области, низкие средние ночные значения обеспечили и низкие средние температуры поверхности по НСО.

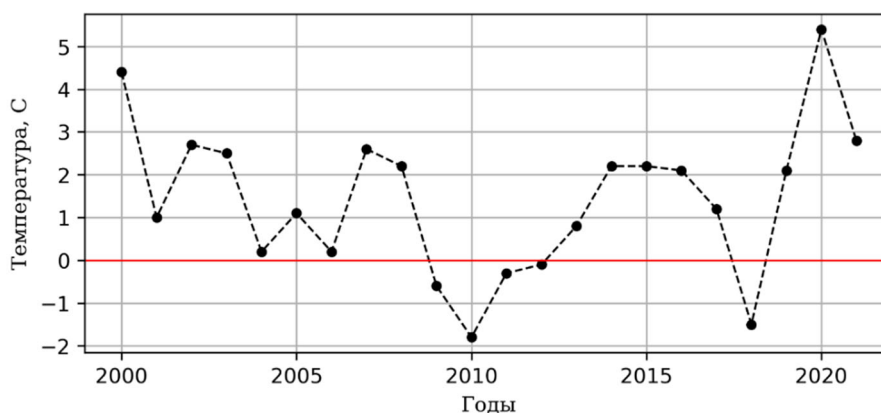


Рис. 2. Среднегодовая температура Новосибирской области, осредненная по данным ночной и дневной съемок

Упомянутая выше суровость климата Новосибирской области обусловлена ее открытостью с севера, незащищенностью с востока и пониженностью рельефа, вследствие чего довольно легко происходит свободный заток холодных арктических воздушных масс и их застои на пониженных элементах рельефа. В отдельные годы этот процесс протекает весьма интенсивно, что приводит к значительным отклонениям от многолетних значений, нарушает общий экологический режим ландшафтов. В результате происходит значительное выхолаживание приземных слоев воздуха и падение температур, в том числе и на поверхности. Таким образом, на территории области формируется длинная и холодная зима, которая сопровождается коротким и не всегда жарким летом. На рис. 4 показаны средние температуры поверхности земли в Новосибирской области за зимний период: с 1 ноября по 31 марта и за летний период: с 1 мая по 30 сентября.

Начнем с зимнего периода. Этот временной промежуток характеризуется, за редким исключением, установлением устойчивого снежного покрова на территории области. На рисунке зимние сезоны нумеруются с зимы 2000–2001 г. (это первая) и заканчиваются зимой 2021–2022 г. Всего в анализе рассматриваются 22 периода. Средняя температура поверхности в зимний период на территории Новосибирской области колеблется от  $-17^{\circ}\text{C}$  до  $-21^{\circ}\text{C}$ , но в рассмотренный период случались и исключения, как в сторону низких температур, так и в сторону более высоких значений. Мягкими можно считать три зимы – это зимы 2001–2002 гг. и 2006–2007 гг. со средней температурой поверхности  $-16.3^{\circ}\text{C}$  и зима 2019–2020 гг. со средней температурой поверхности  $-15.5^{\circ}\text{C}$ . А вот самыми морозными оказались четыре зимы 2000–2001 гг. (средняя температура поверхности  $-21.5^{\circ}\text{C}$ ), 2009–2010 гг. ( $-25.8^{\circ}\text{C}$ ), 2012–2013 гг. ( $-22.7^{\circ}\text{C}$ ), 2020–2021 гг. ( $-21.6^{\circ}\text{C}$ ). Причем зима 2009–2010 гг. была аномально холодной за

первые два десятилетия XXI века. И еще четыре зимы были довольно холодными, имели средние температуры поверхности чуть ниже  $-21^{\circ}\text{C}$ .

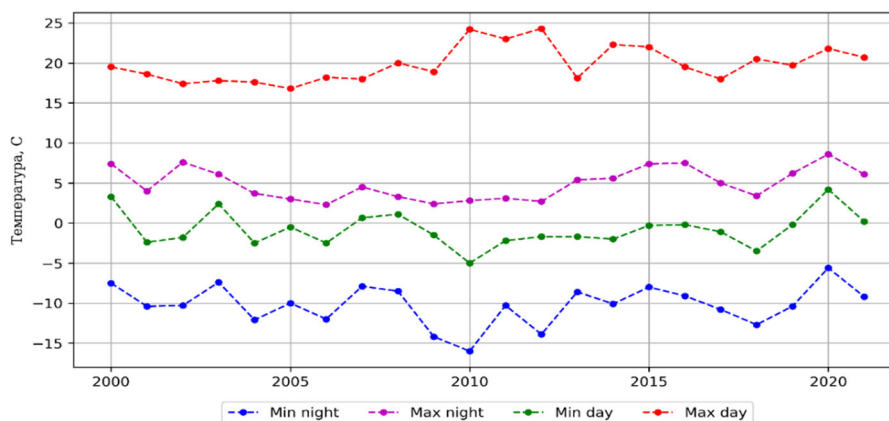


Рис. 3. Минимальные и максимальные значения среднегодовых температур поверхности Новосибирской области по данным ночной и дневной съемок

Изучение повторяемости холодных зим за долгий ряд лет и выявление погодно-климатической системы в этом процессе помогут с большей долей вероятности предсказывать метеорологические режимы зимних периодов, что, безусловно, будет способствовать своевременной защите населения от негативных природных воздействий.

Аналогично были рассчитаны средние значения температуры поверхности земли в Новосибирской области для условно летнего периода с 1 мая по 30 сентября (рис. 4). Скорее этот период можно классифицировать как период с точно отсутствующим снежным покровом. В этот сезон средняя температура поверхности в основном меняется от  $15.5^{\circ}\text{C}$  до  $17^{\circ}\text{C}$ . Исключения составили четыре года: 2003, 2004, 2012 и 2020 со средними летними температурами поверхности  $17.5^{\circ}\text{C}$ ,  $17.2^{\circ}\text{C}$ ,  $18.7^{\circ}\text{C}$  и  $17.7^{\circ}\text{C}$ , соответственно, и два года с холодными летними периодами: 2009 и 2013, когда средняя летняя температура поверхности равнялась  $14.9^{\circ}\text{C}$  и  $14.7^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Были определены также получены средние температуры поверхности по региону для календарно «летнего» периода – с 1 июня по 31 августа. Можно увидеть, что самые холодные летние месяцы (по средней температуре) были в 2001 ( $17.0^{\circ}\text{C}$ ), 2002 и 2009 гг. ( $16.9^{\circ}\text{C}$ ). Самое теплое лето наблюдалось в 2012 г. ( $21.5^{\circ}\text{C}$ ). Другие рассмотренные летние периоды были примерно равными с колебаниями средней температуры от  $17.6^{\circ}\text{C}$  до  $19.0^{\circ}\text{C}$ .

Суммируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод. Только зима 2009–2010 гг. и холодное лето 2010 г. дали в целом и низкую среднюю температуру в 2010 г. Обращают на себя внимание два года – 2000 и 2020. В эти годы были относительно холодные зимы ( $-21.6^{\circ}\text{C}$  и  $-21.3^{\circ}\text{C}$  соответственно), умеренно теплые летние периоды ( $16.6^{\circ}\text{C}$  и  $17.7^{\circ}\text{C}$  соответственно), но в итоге средние температуры за год показали значительное превышение средних температур

(4.5°C и 5.4°C) по сравнению с другими годами первых двух десятилетий нынешнего века. И еще представляет интерес 2010 г. Это был год с парадоксально холодным летом, которое контрастировало с аномальной летней жарой в Восточной Европе. И то, и другое объясняется меридиональным переносом воздушных масс. А вот средняя температура за 2018 г. была довольно низкой (даже отрицательной) –1.5°C, хотя и зимние, и летние средние температуры не выходили за границы характерных интервалов соответствующих периодов.

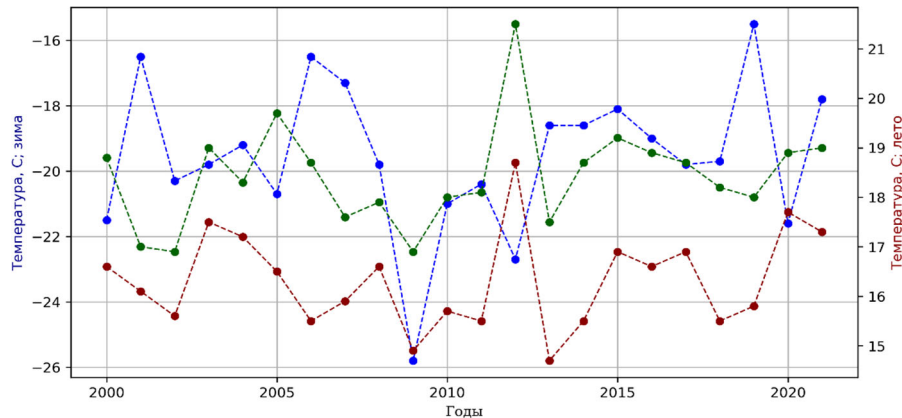


Рис. 4. Средняя температура Новосибирской области по данным ночной и дневной съемок за период с 1 ноября по 31 марта (синий цвет), за период с 1 мая по 30 сентября (красный цвет), за период с 1 июня по 31 августа (зеленый цвет)

В Новосибирской области, как и в целом в Западной Сибири, выражена весьма отчетливо широтная природно-климатическая зональность. По зональному районированию в области формируются ландшафтные типы климатов леса, лесостепи и степи, которые дополнительно еще подразделяются на ряд ступеней ландшафтной классификации (классификация предложена А.П. Слядневым) (рис. 5). По данным Гидрометслужбы среднегодовая температура почвы на её поверхности изменяется, придерживаясь упомянутой зональности, на 1–2°C.

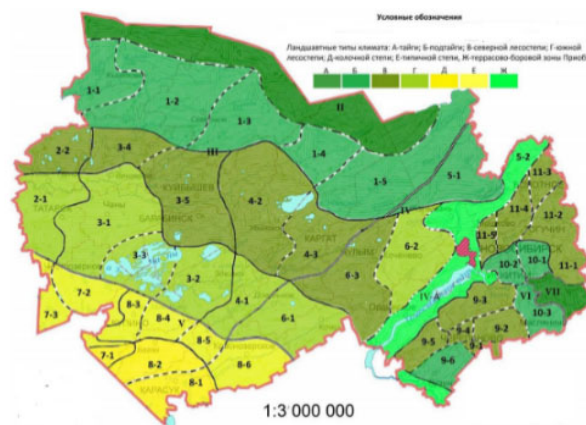


Рис. 5. Природно-климатическое районирование по А.П. Слядневу [13]



На рис. 6 показаны распределения средней температуры поверхности по Новосибирской области соответствующие зимнему периоду – с 11 ноября 2009 г. по 31 марта 2010 г. (рис. 6, а), летнему – с 1 мая по 30 сентября 2010 г. (рис. 6, б), за календарный год – 2010 (рис. 6, в). Год 2010-й выбран как аномально холодный в текущем столетии, а зима 2009–2010 гг. также считается самой суровой за первые два десятилетия этого века.

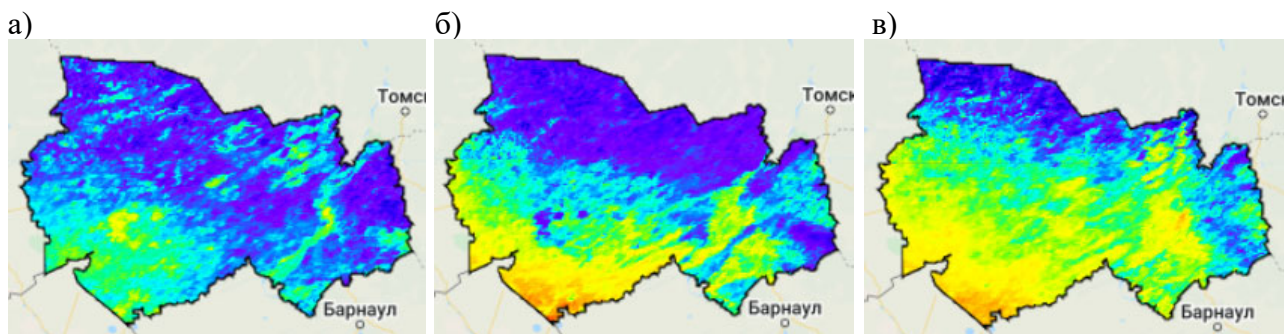


Рис. 6. Распределение средней температуры за 2010 г.: а) зима (–30,–13), б) лето (12,36), в) год (–7,7). В скобках указаны границы интервалов изменения значений температур поверхности. Цвет изменяется от синего (нижняя граница интервала) до желтого (красного) (верхняя граница интервала)

Заметим, что обсуждаемые данные вполне соответствуют широтной зональности, характерной для юго-востока Западной Сибири. Так, с юга на север, по зонам, наблюдается стабильное понижение средних отрицательных (для зимнего периода), средних положительных (для летнего периода), а также в целом среднегодовых температур поверхности. Суровость зимнего периода отчетливо возрастает с юга на север, в том же направлении во время зимних периодов увеличивается и экологическая нагрузка на человека и животных. Широтная зональность климатов и ландшафтов в Правобережье нарушается. Здесь наблюдаются сложные сочетания различных типов климата, связанных с рельефом территории.

Год 2020-й оказался самым теплым в XXI веке, о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 7. Здесь зимним считается период с 1 ноября 2019 г. до 31 марта 2020 г., летним – с 1 мая по 30 сентября 2020 г.

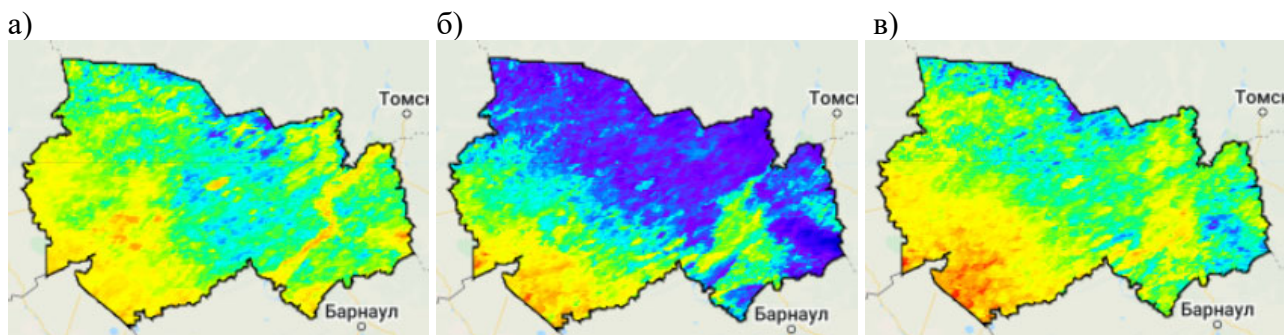


Рис. 7. Распределение средней температуры за 2020 г.: а) зима (–21,–8), б) лето (14,26), в) год (1,11). В скобках указаны границы интервалов изменения значений температур поверхности. Цвет изменяется от синего (нижняя граница интервала) до желтого (красного) (верхняя граница интервала)

## Заключение

Изучение температуры подстилающей поверхности позволяет выявить особенности почвенного климата, что важно для исследования и прогнозирования экологических процессов и их взаимодействия с двумя взаимопроникающими средами – почвенной и растительной. Полученные в ходе такого исследования результаты могут послужить основой для районирования территории с целью ее хозяйственного освоения.

На фоне стабильного потепления климата происходят нестабильные кратковременные понижения либо повышения температур поверхности, что подчёркивает экстремальность климата НСО во всех её зонах, усиливает процессы экологической нестабильности, усложняет возможность долгосрочного прогнозирования, следовательно, и эколого-экономического планирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Koennen G.P., Boehm R., Demaree G., Gocheva A., Mileta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C., et al. Daily surface air temperature and precipitation dataset 1901–1999 for European Climate Assessment (ECA) // *International Journal of Climatology*, 2002. Vol. 22. pp. 1441-1453.
2. Kjellstrom E., Boberg F., Castro M., Christensen J.H., Nikulin G., Sanchez E., Daily and monthly temperature and precipitation statistics as performance indicators for regional climate models // *Climate Research*, 2010. Vol. 44. pp. 121-134.
3. Kudryasheva S.Ya., Chumbaev A.S., Pestunov I.A., Sinyavskiy Y.N., Chubarov D.L., Bezborodova A.N., Ermakov N.B. Cartographic Modeling of Soil Temperature Fields for Middle Siberia Transect Based on Conjoint Analysis of Automated Ground-based and Satellite Temperature Data // *CEUR Workshop Proceedings*, 2020. Vol. 2534. P. 124-131. [http://ceur-ws.org/Vol-2534/21\\_short\\_paper.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2534/21_short_paper.pdf) (дата обращения 15 мая 2021).
4. Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Тепловые аномалии Барабинской низменности. Первые результаты // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 4. № 1. С. 28-36.
5. Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Анализ временных рядов температуры поверхности Земли // В сборнике: *Труды Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика"*, посвященной 90-летию со дня рождения академика А. С. Алексеева. 2018. С. 108-114.
6. Voronina P.V., Chubarov D.L., Dobretcov N.N. The Study of the Temperature Regime of the Novosibirsk Agglomeration According to the Satellite Sensing Data // *CEUR Workshop Proceedings*, 2020. Vol. 2534. P. 327-333. [http://ceur-ws.org/Vol-2534/55\\_short\\_paper.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2534/55_short_paper.pdf) (дата обращения 15 мая 2021).
7. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*. 2003. No. 86. P. 370-384.
8. Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. No. 64. P. 335-344.
9. Weng Q., Quattrochi D.A. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // *Remote Sensing of Environment*. 2006. No. 104. P. 119-122.
10. Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. No. 96. P. 145-153.
11. Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval // *Remote Sensing of Environment*. 2006. No. 104. P. 211-225.



12. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – 121 с.
13. Воронина Л.В., Гриценко А.Г. Климат и экология Новосибирской области. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 228 с.
14. Кравцов В.М., Донукалова Р.П. География Новосибирской области. – Новосибирск: Инфолио-пресс, 1999. – 205 с.
15. Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 157-174.
16. Shokin Y.I., Pestunov I.A., Chubarov D.L., Kikhtenko V.A., Mamash E.A., Dobretsov N.N., Voronina P.V., Sinyavsky Y.N. Information System for Satellite Data Acquisition, Archiving and Analysis as an Instrument for Monitoring of Objects of Artificial and Natural Origin // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol. 2534. P. 229-240. [http://ceur-ws.org/Vol-2534/39\\_short\\_paper.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2534/39_short_paper.pdf) (дата обращения 15 мая 2021).
17. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
18. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. No. 4. P. 892-905.

© П. В. Воронина, 2022