

## **ТЕПЛОВЫЕ АНОМАЛИИ БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

### ***Полина Владимировна Воронина***

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)334-91-77, e-mail: pol.voronina@gmail.com; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент

### ***Дмитрий Леонидович Чубаров***

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)334-91-15, e-mail: dchubarov@ict.nsc.ru

### ***Николай Николаевич Добрецов***

Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-76-37, e-mail: nickdobretsov@gmail.com; Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий научный сотрудник, тел. (383)334-91-15

Представлены результаты применения метода поиска статистических отклонений RST (Robust Satellite Technique) в пространственно-временных рядах спутниковых данных температуры поверхности Земли для территории Барабинской низменности.

**Ключевые слова:** MODIS, обработка спутниковых данных, температура поверхности, температурные аномалии, статистические выбросы, метод RST (Robust Satellite Technique).

## **TEMPERATURE ANOMALIES ON THE TERRITORY OF BARABINSKAYA LOWLAND. THE FIRST RESULTS**

### ***Polina V. Voronina***

Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)334-91-77, e-mail: pol.voronina@gmail.com; Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Associate Professor

### ***Dmitri L. Chubarov***

Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)334-91-15, e-mail: dchubarov@ict.nsc.ru

### ***Nikolay N. Dobretsov***

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-76-37, e-mail: nickdobretsov@gmail.com; Institute of Computational Technologies SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Researcher

We present the results of the development of RST (Robust Satellite Technique) method to detect statistical deviations in spatial-time series of satellite land surface temperature data under the Baraba.

**Key words:** MOIDS, satellite remote sensing data processing, Land Surface Temperature (LST), statistical deviations, method RST (Robust Satellite Technique).

### *Введение*

Изучение температуры поверхности Земли важно в процессе исследования поведения региональных геосистем, изменений климата в региональном и планетарном масштабах [1]. При этом изменение температуры используется как индикатор для оценки и коррекции глобальных и региональных климатических моделей [2]. В анализе динамики региональных геосистем представляется важным выявить аномальные значения температуры, т. е. определить выбросы в пространственно-временных рядах данных.

Для решения этих весьма актуальных в настоящее время задач имеет смысл использовать данные дистанционного зондирования, но при этом исследователь неизбежно сталкивается с необходимостью проведения пространственно-временного анализа спутниковых измерений для больших территорий и за достаточно продолжительный временной период. На протяжении всего периода цифровой съемки планеты разработаны количественные методы восстановления по данным дистанционного зондирования в различных спектральных диапазонах мгновенных значений параметров, описывающих протекающие на поверхности Земли процессы. Сложность задачи определения динамики этих процессов заключается в большом объеме накопленных данных, наличии факторов, искажающих измеряемый сигнал, сложности самих изучаемых процессов.

В настоящей работе представлены первые результаты анализа температурных рядов данных дистанционного зондирования и выявления тепловых аномалий в них для территории юга Западной Сибири – Барабинской низменности (степи). Барабинская низменность – лесостепная равнина в южной части Западной Сибири в междуречье Иртыша и Оби. Ее площадь составляет около 117 тыс. кв. км со всхолмленным рельефом. Перепады высот достигают 100–150 м, в южной половине отчетливо выражены параллельные повышения (гривы), занятые луговыми степями, разнотравными лугами и березовыми колками на чернозёмах, солонцах и серых лесных почвах. В понижениях между гривами располагаются свыше 2000 пресных и соленых озер, крупнейшие из которых Чаны, Убинское, Сартлан; сфагновые болота; займища и солончаковые луга [3].

Барабинская степь – уникальный объект исследований в планетарном масштабе именно в силу равнинного характера своего рельефа, где практически в идеальном виде проявляется природная широтная зональность (рис. 1). Это делает исследуемый регион перспективным для понимания динамики изменения зональности экосистем в условиях меняющегося климата.

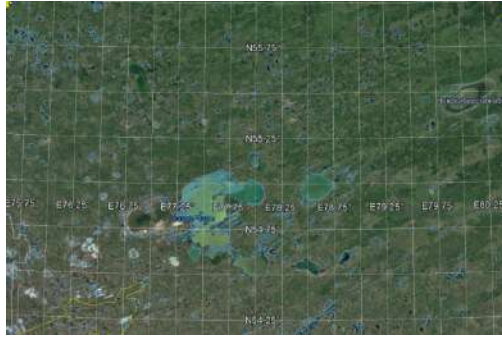


Рис. 1. Область исследования – территория Барабинской низменности (Google Earth Pro)

### *Методы и материалы*

Метод RST (Robust Satellite Techniques), предложенный исследователями для обнаружения аномальных отклонений температуры поверхности до и после сильных сейсмических событий [4–11], использован и в нашей работе для анализа температурных полей поверхности Барабинской степи.

В основе метода лежит статистический анализ наборов спутниковых данных температуры земной поверхности для выделенной территории, охватывающей основные геолого-почвенные структуры. Для исключения влияния сезонного хода температур и неоднородности рельефа происходит преобразование данных. Сначала фиксируется интересующий исследователя временной интервал, извлекаются температуры в эти дни года за несколько лет. Далее по выбранной области вычисляется индекс RST –  $\eta(\mathbf{r}, t')$ . Основным достоинством индекса является то, что при выборе области и временного интервала подходящих размеров он позволяет исключить влияние вариаций температуры, вызванных климатическими процессами, неоднородностью рельефа и погодными условиями [10, 11].

Индекс RST вычисляется по формуле:

$$\eta(\mathbf{r}, t') = \frac{T(\mathbf{r}, t') - \langle T(\mathbf{r}, t') \rangle_s - \langle \Delta T(\mathbf{r}, t') \rangle_t}{\sigma_{\Delta T}(\mathbf{r})},$$

Здесь  $\mathbf{r} \equiv (x, y) \in D$  – географические координаты центра пикселя,  $T(\mathbf{r}, t')$  – температура в момент времени  $t'$  в пикселе  $\mathbf{r}$ ,  $\langle T(\mathbf{r}, t') \rangle_s$  – среднее по области значение температуры,  $\langle \Delta T(\mathbf{r}, t') \rangle_t$  – среднее по времени значение температуры в пикселе  $\mathbf{r}$ ,  $\sigma_{\Delta T}(\mathbf{r})$  – среднеквадратичное отклонение  $T(\mathbf{r}, t)$  от  $\langle \Delta T(\mathbf{r}, t') \rangle_t$ .

Как и в [11], анализ температурных полей проводился по восстановленным на основе двухканального алгоритма Вана и Дозьера [12] по измерениям интенсивности инфракрасного излучения, регистрируемого в каналах 31 (длина вол-

ны – 11 мкм) и 32 (длина волны – 12 мкм) сенсора MODIS, составляющим информационные продукты MOD11A1. Эти продукты накапливаются в архиве ИВТ СО РАН, начиная с 2000 г., и покрывают значительную часть территории Северной Евразии. Значения температуры восстанавливаются. Содержащиеся в MOD11A1 данные представлены на регулярной сетке в синусоидальной проекции с размером ячейки около 1 км. При хороших атмосферных условиях наблюдения алгоритм обеспечивает точность восстановления температуры в пределах 1 К.

В работе [11] авторами модифицирован метод RST путем вычисления накопительной суммы значений индекса  $\eta(\mathbf{r}, t')$ , признанных аномальными, т. е. суммируются только те значения индекса, которых превышают так называемое пороговое значение, в нашем случае оно равно 2.

В качестве исходных данных для метода RST в настоящем исследовании использовались значения ночных температур за период с 1 мая по 10 октября в течение 2001–2015 гг. Временной интервал составляет 163 дня, примерно половина из которых – это дни с облачностью, т.е. в эти дни отсутствуют данные о температуре, и мы имеем ряды с пропусками.

Требуемые данные организованы в виде файлового архива, к которому на основе технологии hVault осуществляется доступ как к реляционной СУБД [11], извлечение и преобразование данных происходит с помощью SQL-запросов.

## *Результаты*

По выбранному временному интервалу с 1 мая по 10 октября для территории Барабинской низменности проведены расчеты с целью выявления аномальных выбросов в пространственно-временных рядах температуры поверхности для каждого года с 2001 по 2015. Для каждого года получены накопительные суммы индекса с аномальными значениями в пикселе и количество аномальных значений индекса в пикселе. По полученным результатам проведено суммирование аномальных значений индекса по всем годам и количество таких аномальных значений в каждом пикселе (рис. 2). На рис. 2 выделяются две локальные области – часть биологического заказника «Успенский» Новосибирской области, так называемое Кундранское займище, через которое протекает р. Каргат (отмечено цифрой 2) и долина р. Омь (отмечена цифрой 1). Обращают на себя внимание аномалии, возникающие на территории болота «Большое займище», отмеченные цифрой 3 на рис. 3. Эти аномалии выделяются на суммарных результатах, но появились они дважды – незначительной площади и интенсивности в 2004 г. и более интенсивно в 2014 г. По территории болота «Большое займище» фактически на рис. 2 мы видим тепловой выброс 2014 г.

Тепловые аномалии в долине р. Омь (область 1) отмечены в 2002, 2003, 2010, 2011 и 2014 гг., но исследовать эту территорию и установить какие-то закономерности достаточно трудно, т.к. область с аномальными пикселями, как она видна на рис. 2 а, получается в результате именно накопления ежегодных аномалий, в отдельные годы аномальные выбросы проявляются частично и уло-

вить их весьма сложно. Стоит еще отметить, что долина реки в верхнем течении неясно выражена, её склоны незаметно сливаются с прилегающей местностью. В последние годы река катастрофически мелеет. Источником воды для р. Омь являются Васюганские болота и озёра Новосибирской области, но с каждым годом водосброс сокращается, в районах, где протекает р. Омь, всё больше ощущается дефицит воды.

С областью, отмеченной на рис. 2 цифрой 2, дело обстоит проще: она практически одной и той же площадью появляется в четырех годах – 2002, 2003, 2010 и 2014 гг.

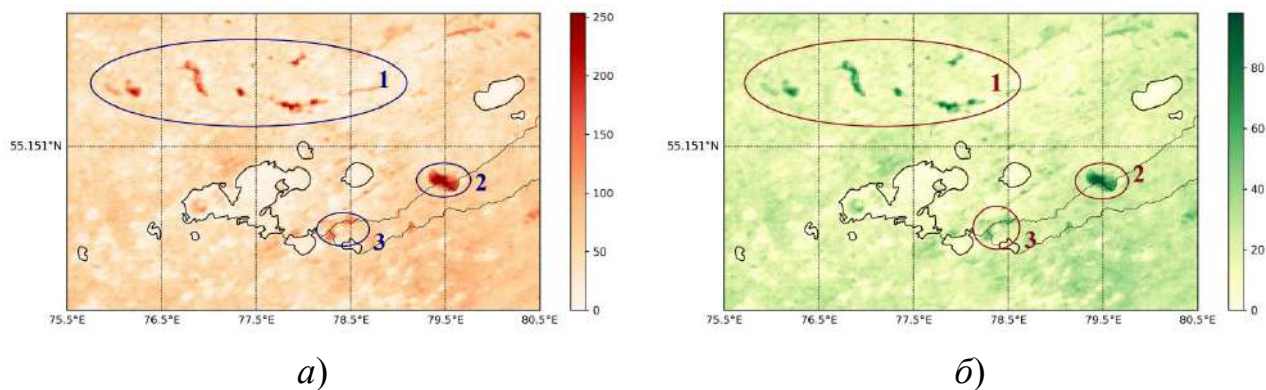


Рис. 2. а) накопительная сумма аномальных значений индекса за 2001–2015 гг.; б) количество пикселей, в которых значение индекса превышает пороговое значение за 2001–2015 гг.

Цифрами отмечены: 1 – Кундранское займище; 2 – болото «Большое займище»; 3 – долина р. Омь

На рис. 3 представлены суммы аномальных индексов для 2010 и 2014 гг., синим цветом выделена территория Кундранского займища, а красным – болото «Большое займище», аномалия в котором появилась только в 2014 г., но по интенсивности сравнима с аномалией Кундрана.

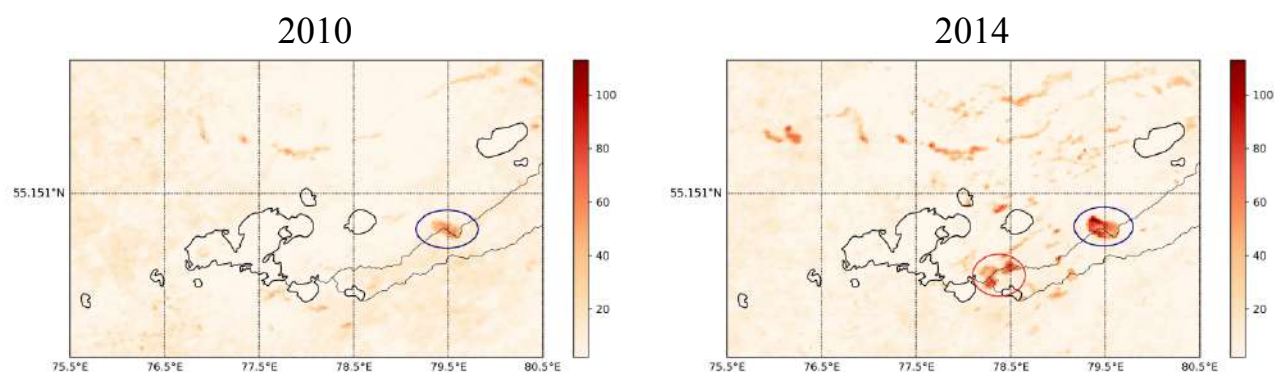


Рис. 3. Накопительная сумма аномальных значений индекса в 2010 и 2014 гг. Синим цветом выделена область с повторяющейся аномалией

Для выявления времени появления аномалий во времени на территории Кундранского займища определим несколько точек, расположенных в пределах аномальной области, для них извлечем временные ряды для годов с аномалиями, и выполним анализ этих рядов, как в [14].

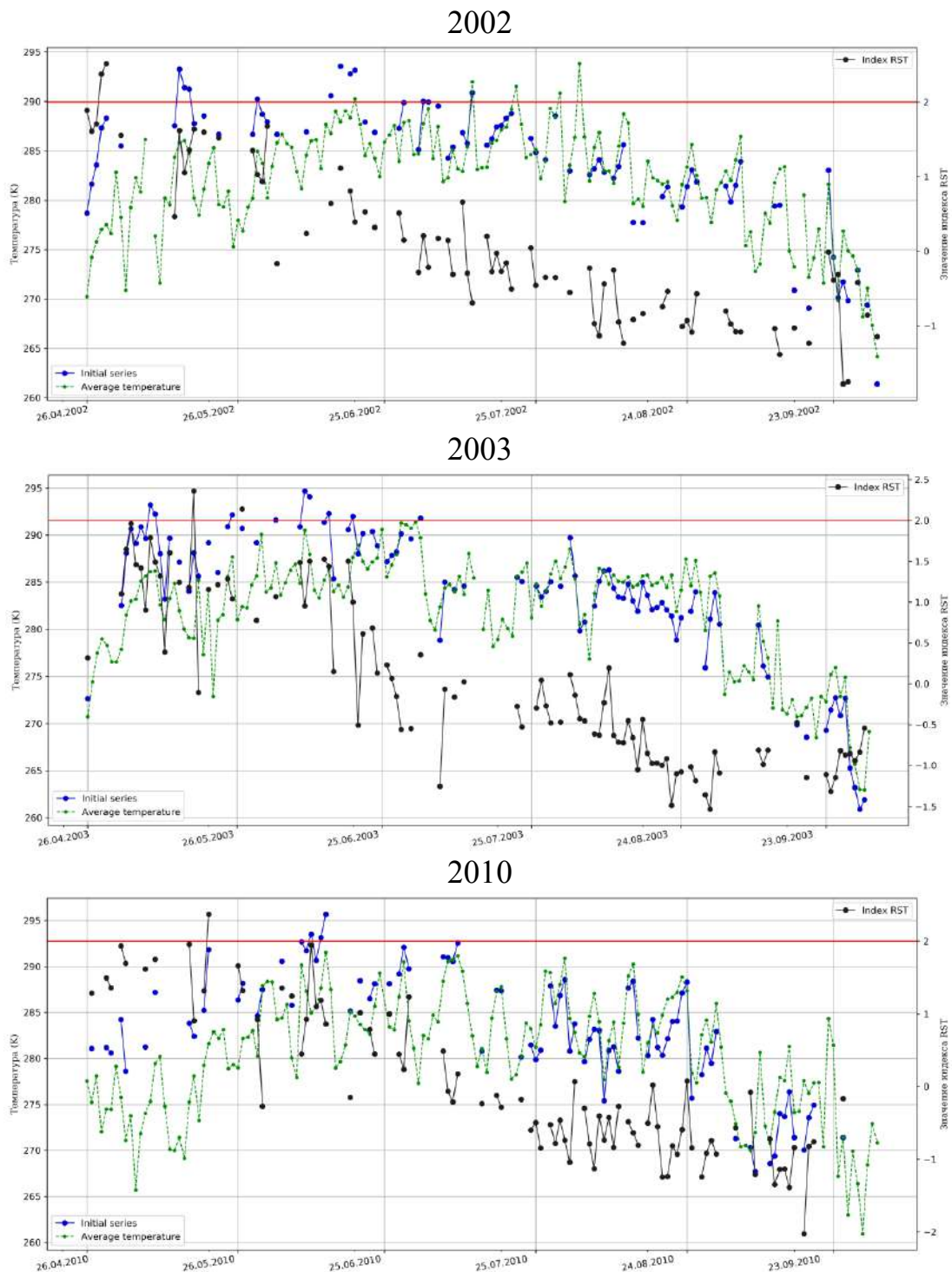


Рис. 4. Температура поверхности, средняя по области температура и индекс RST для точки с координатами 79°42 в.д. и 54°97 с.ш. для 2002, 2003, 2010 гг.

На рис. 4 представлены результаты анализа температурного ряда для точки с координатами 79°42 в.д. и 54°97 с.ш. Синим цветом изображен исходный анализируемый ряд температур. Видно, что участки со сплошной линией встречаются, но их немного, что говорит об отсутствии измерений, т.е. это временной ряд с пропусками. Зеленым цветом показана фоновая, или средняя по области, температура. Здесь же нарисован график индекса RST (шкала справа). Красная горизонтальная линия показывает пороговое значение, превышение индекса RST означает аномальное значение температуры. Установлено, что во все года аномалия появлялась в первую четверть анализируемого периода (превышение порогового значения, изображенного линией красного цвета).

Для проверки высказанной гипотезы проведены расчеты для 2014 г. для двух периодов отдельно. Первый период – с 1 мая по 12 июня, второй – с 13 июня по 10 октября. На рис. 5 показаны результаты расчетов. Интересующая нас область выделена синим цветом под цифрой 1. Видно, что в первый временной интервал (рис. 5, а) аномалия присутствует, причем при сравнении с результатами расчетов по всему периоду 2014 г. (рис. 3) интенсивность аномалии не изменилась. На рис. 5, б показаны аномалии для второго временного интервала, а именно с 13 июня до 10 октября. И в этот период тепловые аномалии на всей территории отсутствуют. Заметим также, что и на территории болота «Большое займище» (рис. 5, цифра 2) аномалии присутствуют в мае-начале июня 2014 г.

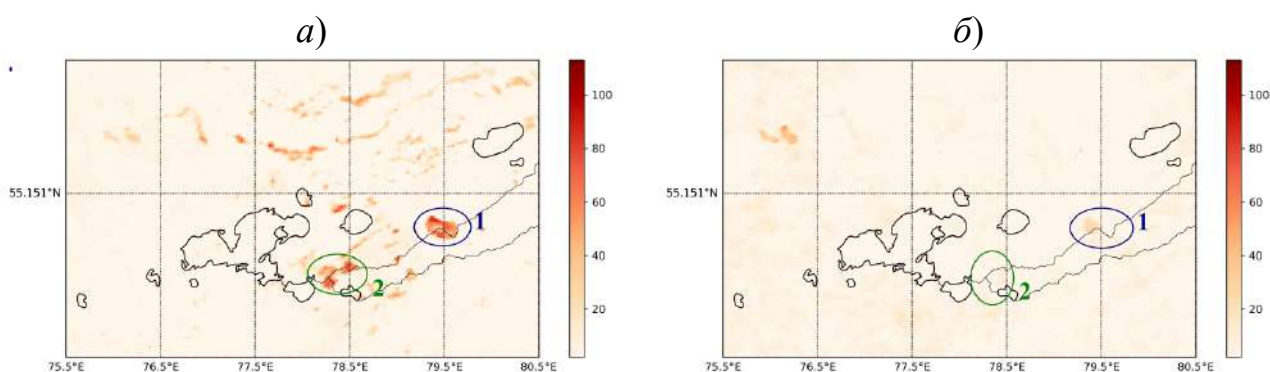


Рис. 5. Накопительная сумма аномальных значений индекса:

а) для периода анализа с 1 мая по 20 июня; б) для периода анализа с 21 июня по 10 октября

### *Заключение*

С помощью модифицированного метода RST для обнаружения выбросов в пространственно-временных рядах проведен анализ температуры поверхности, полученной по данным дистанционного зондирования, для территории Барабинской низменности для 2001–2015 гг. Выявлены области с устойчивой по пространству тепловой аномалией (долина р. Омь, Кундранское займище, боло-

то «Большое займище»), проявляемой в 2002, 2003, 2010 и 2014 гг. Для территории Кундранского займища установлено, что аномальное превышение температуры поверхности происходит в первую четверть рассматриваемого периода с 1 мая по 10 октября, т.е. в мае-начале июня. О продолжительности аномалий и их интенсивности сказать ничего конкретного нельзя из-за неполноты анализируемого ряда.

#### 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. Кузнецов А. В., Кузнецов Н. А. Охотничьи угодья Новосибирской области / 3-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск : Новосибирское книжное издательство, 1987. – 232с.
4. Tramutoli V. (2001) Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas / Tramutoli V., Di Bello G., Pergola N. and Piscitelli S. // *Ann. di Geofis.*, 44(2), 295-312.
5. Tramutoli V. (2013) On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in Earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST) / Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N. // *Chemical Geology*, 339, 157-168, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.10.042.
6. Filizzola C. (2004) Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's Earthquake / Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V. // *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(4-9), 517-527, doi:10.1016/j.pce.2003.11.019.
7. Aliano C. (2008) Robust TIR satellite techniques for monitoring Earthquake active regions: limits, main achievements and perspectives / Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Pergola N., Tramutoli V. // *Annals of Geophysics*, Vol. 51, N. 1.
8. Genzano N. (2009) RST analysis of MSG-SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 Earthquake / Genzano N., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Lisi M., Mazzeo G., Paciello R., Pergola N., Tramutoli V. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 2073-2084.
9. Genzano N. (2007) Robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat Earthquake / Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N., Tramutoli V. // *Tectonophysics*, 431, 197-210.
10. Corrado R. (2005) Seismically active area monitoring by robust TIR satellite techniques: a sensitivity analysis on low magnitude Earthquakes in Greece and Turkey / Corrado R., Caputo R., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5: 101-108.
11. Воронина П. В., Чубаров Д. Л., Добрецов Н. Н. Развитие метода RST (Robust Satellite Technique) для выявления аномалий температуры поверхности на территории Горного Алтая // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 64–73.
12. Wan Z. (1996) A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space / Wan Z., Dozier J. // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 34. No. 4. P. 892–905.



13. Шокин Ю.И. (2015) Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды / Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. // Вычислительные технологии. Т. 20. № 5. С. 157-174.

14. Воронина П. В. (2017) Анализ временных рядов температуры поверхности Земли / Воронина П. В., Чубаров Д. Л., Добрецов Н. Н. // В сборнике: Труды Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика", посвященной 90-летию со дня рождения академика А. С. Алексеева. – 2018. – С. 108–114.

*© П. В. Воронина, Д. Л. Чубаров, Н. Н. Добрецов, 2019*