

## ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА LANDSAT-8.

Е. А. Ярош<sup>1</sup>, М. В. Бируков<sup>2</sup>, Е. А. Прокопчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>кафедра общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики  
Белорусского государственного университета, г. Минск, zenya2004.6@gmail.com

<sup>2</sup>кафедра почвоведения и геоинформационных систем факультета географии  
и геоинформатики Белорусского государственного университета, г. Минск

**Т. В. Шлендер**

преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета  
географии и геоинформатики Белорусского государственного университета

В данной работе используется автоматическая методика обработки спутниковых снимков на облачной платформе Google Earth Engine с целью получения карт температур земной поверхности для крупных городов Беларуси. Приводятся подробные поэтапные расчетные формулы определения температуры земной поверхности. Обработка спутниковых снимков выполнялась в ГИС QGIS 3.2. В результате были получены усредненные карты поверхностной температуры для городов Минск, Брест, Гомель, Гродно, Витебск и Могилев за период 2013–2021 гг. Проведено описание карт для каждого города. Самые теплые зоны в городах расположены в промышленных районах. Сделаны выводы о использовании данного метода в целях изучения городского климата.

**Ключевые слова:** городской остров тепла; температура земной поверхности; LST; Landsat-8; Google Earth Engine; тепловые аномалии.

**Введение.** Температура земной поверхности (Land Surface Temperature – LST) является важным компонентом энергетического баланса Земли. LST полученная по данным дистанционного зондирования все чаще используется в различных приложениях, связанных с оценкой земель, картографирования городских территорий и интенсивности городского острова тепла, оценкой эвапотранспирации, испарения с высоким разрешением для управления водными ресурсами, оценкой засух и лесных пожаров и пр. [1–4].

Рост городского населения, социально-экономическое развитие городов способствовали появлению такого феномена как городской остров тепла (Urban Heat Island, UHI) [5]. Городской остров тепла может определяться различными методами. Например, по приземным температурам воздуха, используя данные наземных метеостанций и приборов [6], или по определению спутниковых данных LST [7]. Метод определения LST успешно используется в исследованиях городского острова тепла во всем мире с помощью спутников – MODIS, Landsat (TM, ETM и OLI/TIRS) и ASTER. Спутники серии Landsat могут предоставить данные для оценки LST с пространственным разрешением до 30 метров, которое особенно подходит для среднemasштабных исследований. Большинство алгоритмов обра-

ботки спутниковых снимков просты в реализации, однако все они требуют необходимых входных данных и калибровочных коэффициентов. Google Earth Engine (GEE; [8]) – это онлайн платформа, которая существенно облегчает обработку и анализ данных дистанционного зондирования. Все данные Landsat Level-1 и 2 напрямую доступны в GEE.

В данной работе будет рассмотрен алгоритм получения LST крупных городов Беларуси в Google Earth Engine, что позволит оценить в дальнейшем микроклиматические изменения и комфортность в городах.

**Методы и данные.** В качестве исходных данных для получения температуры земной поверхности использовались снимки спутника Landsat – 8 (тепловой канал инструмента – TIRS, Band 10, диапазон канала 10.6–11.19 нм). Отбор и обработка выбранных снимков выполнены на облачной платформе GEE, которая использует ресурсы Национальной геологической службы США, USGS [9]. Данный сервис позволяет значительно сократить время обработки больших массивов данных и автоматизировать решение задач. На GEE поэтапно выполнены процедуры подбора снимков по указанному временному диапазону версии Landsat – 8 (с февраля 2013 г. по наст. время) и облачности. Данная коллекция уже имеет атмосферную коррекцию снимков по данным реанализа NCEP/NCAR reanalysis.

Вычисление температуры земной поверхности базируется на расчетах спектрального излучения, отражательной способности земной поверхности, температуре черного тела на поверхности атмосферы (Top Of Atmosphere - TOA), NDVI (4 и 5 Band) и расчета на их основе LST.

Данные Landsat - 8 Collections Level-1 содержат тепловые константы, необходимые для преобразования данных инфракрасного теплового диапазона в яркостную температуру TOA. Формулы для этих преобразований представлены на ресурсе [10]. Расчетная формула излучения:

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (1)$$

где  $L\lambda$  – спектральное излучение TOA ( $Вт / (м^2 * срад * мкм)$ );  $ML$  – коэффициент мультипликативного масштабирования для конкретного диапазона из метаданных Landsat ( $RADIANCE\_MULT\_BAND\_x$ , где  $x$  – номер диапазона);  $AL$  – аддитивный коэффициент масштабирования для конкретного диапазона из метаданных Landsat ( $RADIANCE\_ADD\_BAND\_x$ , где  $x$  – номер диапазона);  $Q_{cal}$  – квантованные и откалиброванные стандартные пиксельные, цифровые исходные значения продукта канала (Digital numbers, DN).

Отражающий канал DN преобразуется в коэффициент отражения TOA с помощью коэффициентов изменения масштаба:

$$\rho_{\lambda}' = M\rho \times Q_{cal} + A\rho \quad (2)$$

где  $\rho_{\lambda}'$  – TOA планетарная отражательная способность без поправки на солнечный угол;  $M\rho$  – коэффициент мультипликативного масштабирования для конкретного диапа-

зона из метаданных (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, где x – номер диапазона);  $A\rho$  – специфичный для полосы коэффициент аддитивного масштабирования из метаданных (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, где x - номер полосы);  $Q_{cal}$  – квантованные и откалиброванные стандартные пиксельные, цифровые исходные значения продукта канала (DN).

Обратите внимание, что  $\rho_\lambda$  не содержит поправки на солнечный угол. Тогда коэффициент отражения TOA с поправкой на солнечный угол будет находиться по формуле:

$$\rho_\lambda = \rho_\lambda / \cos(\theta_{SZ}) = \rho_\lambda / \sin(\theta_{SE}) \quad (3)$$

где  $\rho_\lambda$  – TOA планетарная отражательная способность;  $\theta_{SE}$  – местный угол возвышения солнца;  $\theta_{SZ}$  – местный зенитный угол Солнца;  $\theta_{SZ} = 90^\circ - \theta_{SE}$ .

Данные теплового диапазона можно преобразовать из спектрального излучения в яркостную температуру TOA (Brightness Temperature), используя термические константы. Яркостная температура вычислялась по следующей формуле [11]:

$$T = K_2 / \ln(K_1 L_\lambda + 1) \quad (4)$$

где  $T$  – температурная яркость на TOA (К);  $L_\lambda$  – спектральная яркость TOA ( $Wt / (m^2 * \text{срад} * \text{мкм})$ );  $K_1$  – зависящая от диапазона константа термического преобразования из метаданных ( $K1\_CONSTANT\_BAND\_x$ , где x – номер тепловой полосы);  $K_2$  – зависящая от диапазона константа термического преобразования из метаданных ( $K2\_CONSTANT\_BAND\_x$ , где x – номер тепловой полосы).

Поправка на растительность определяется с помощью параметра Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), в работе [12] советуют рассчитывать долю растительного покрова (Fractional Vegetation Cover – FVC) на основе значений NDVI:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min})^2 \quad (5)$$

где NDVI – значение NDVI;  $NDVI_{\min}$  – минимальное значение NDVI;  $NDVI_{\max}$  – максимальное значение NDVI.

Значения FVC затем используются вместе с ранее вычисленной излучательной способностью для открытой поверхности.

Итоговая расчетная формула температуры земной поверхности LST:

$$LST = T_B / [1 + (\lambda * T_B / c_2) * \ln(e)] \quad (6)$$

где  $T_B$  – TOA яркостная температура;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $c_2 = h * c / s = 1.4388 * 10^{-2}$  м К,  $h$  – Постоянная Планка =  $6.626 * 10^{-34}$  Дж с,  $s$  – постоянная Больцмана =  $1.38 * 10^{-23}$  Дж/К,  $c$  – скорость света =  $2.998 * 10^8$  м/с;  $e$  – излучательная способность земной поверхности.

Подробный алгоритм получения значений LST с помощью GEE рассмотрен в работе [13].

Полученный растр LST далее редактировался в программной среде ГИС QGIS 3.2, где выбирались цветовые заливки и редактировалась итоговая карта. Разрешение растра – 30 метров. В качестве исходных данных для выделения границ крупных городов были использованы генеральные планы и ресурс OpenStreet Maps (OSM) [14] для городов Минск, Брест, Гомель, Могилев, Гродно и Витебск. Применялась система координат проекта WGS 84 / UTM Zone 36N.

Для получения LST для всех крупных городов Беларуси были выбраны снимки в период с февраля 2013 г. по октябрь 2021 г., ввиду того, что снимки спутника Landsat-8 имеются в лишь в данный промежуток времени. Был установлен фильтр по облачности (менее 15%). На основе всех отобранных снимков был получен обобщенный растр путем применения медианной функции в скрипте GEE. Таким образом итогом являлась усредненная модель LST.

**Результаты.** В итоге были получены карты LST для всех крупных городов Беларуси – Минск, Гродно, Гомель, Витебск, Могилев и Брест. На рисунке 1 представлены карты LST г.Бреста и г.Гродно. Наибольший значения температур земной поверхности (30 и выше  $^{\circ}\text{C}$ ) в г. Бресте соответствуют центральной части города – БЭМЗ, Электроламповый завод, ЖД пути и сопутствующие застройки. В г.Гродно к основными температурным пикам приурочены – завод «Химволокно» и стеклозавод по левую сторону р. Неман, на севере города максимум LST объясняется расположением социально-торговых объектов с темной поверхностью крыш зданий.

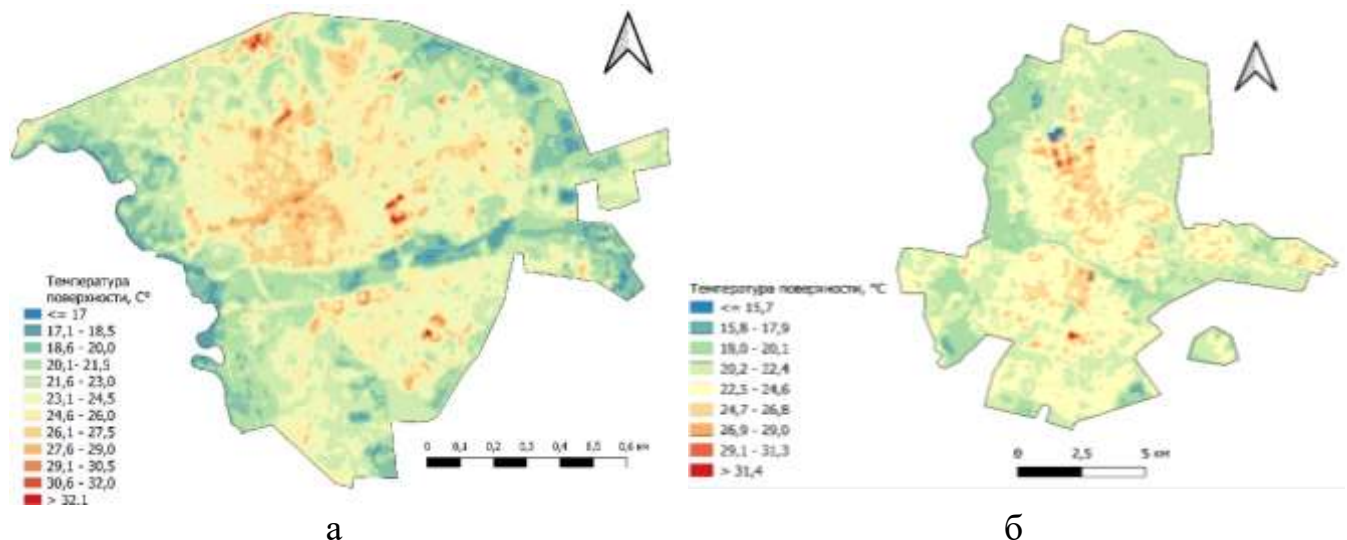


Рисунок 1. Температура земной поверхности для г.Бреста (а) и г.Гродно (б).

На рисунке 2 представлены карты значений LST для г.Гомель и г.Могилев. Большинство максимумов температур земной поверхности (около  $30^{\circ}\text{C}$ ) совпадает с расположением производственных зон на карте г. Могилева. На юге – ОАО

«Могилевхимволокно», Омск Карбон Могилев, на северо-востоке – ЗАО «Могилевский КСИ», Завод «Полимерных Труб», Завод «Могилевтрансмаш», на западе – авторемонтный завод, завод искусственного волокна, на юго-западе – Литейный завод, на юго-востоке – инструментальный завод, автомобильный завод, на востоке – завод Электродвигатель, «Лифтмаш», завод «Зенит», завод «Техноприбор», завод «Ольса»). В г.Гомеле максимумы LST (выше 30<sup>0</sup>С) приходится на территории заводов литья и нормалей, завод станочных узлов, завод металлоконструкций и радиозавод на северо-западе города; на севере – территория Гомсельмаша.

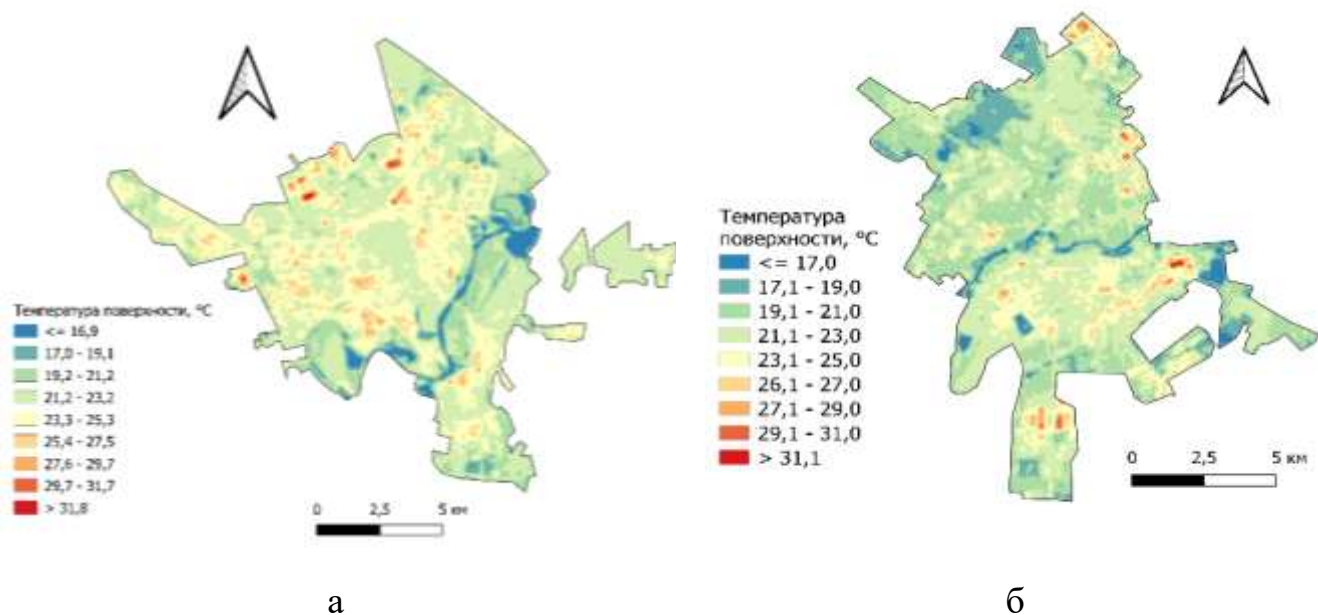


Рисунок 2. Температура земной поверхности для г. Гомеля (а) и г. Могилева (б)

На рисунке 3 представлены карты значений LST для г.Витебска и г.Минска. Наибольшие положительные отклонения температур г.Минска по сравнению с пригородной частью города наблюдаются в центре города в промзонах – ТЭЦ-2, «Мотовело», Ремонтно-механический завод; на юго-востоке – на территориях заводов МАЗ, МЗКТ, заводы микрорайона Шабаны и др.; на северо-западе – завод металлоконструкций, радиаторный завод, завод отопительных конструкций, «Атлант» и др.; на юго-западе – завод силикатных изделий, бетонный завод, завод «Керамин», завод «Транзистор», «Интеграл», ТЭЦ-4 и др. В центре г.Витебска максимумы температур (выше 30<sup>0</sup>С) характерны для завода «Вистан», сборного железобетона и др. В восточной части города – моторемонтный завод, завод «СОЮЗ-КАБЕЛЬ», завод «Эвистор» и «Визас».

**Заключение.** Онлайн платформа GEE позволяет легко анализировать большие объемы данных, в отличие от прошлых работ, где рассматривался LST для г.Минска и г.Могилева [15–16]. Более того, не требуется загружать какие-либо данные, а освоив алгоритм оформления и написания кода, можно выполнить все

виды анализа прямо в GEE, например, получение средней карты LST. Для каждой коллекции Landsat коэффициенты алгоритма были получены с использованием той же калибровочной базы данных, тем самым обеспечив согласованность между коллекциями данных спутника [13]. Все полученные карты уже имеют атмосферную коррекцию по данным реанализа NCEP / NCAR.

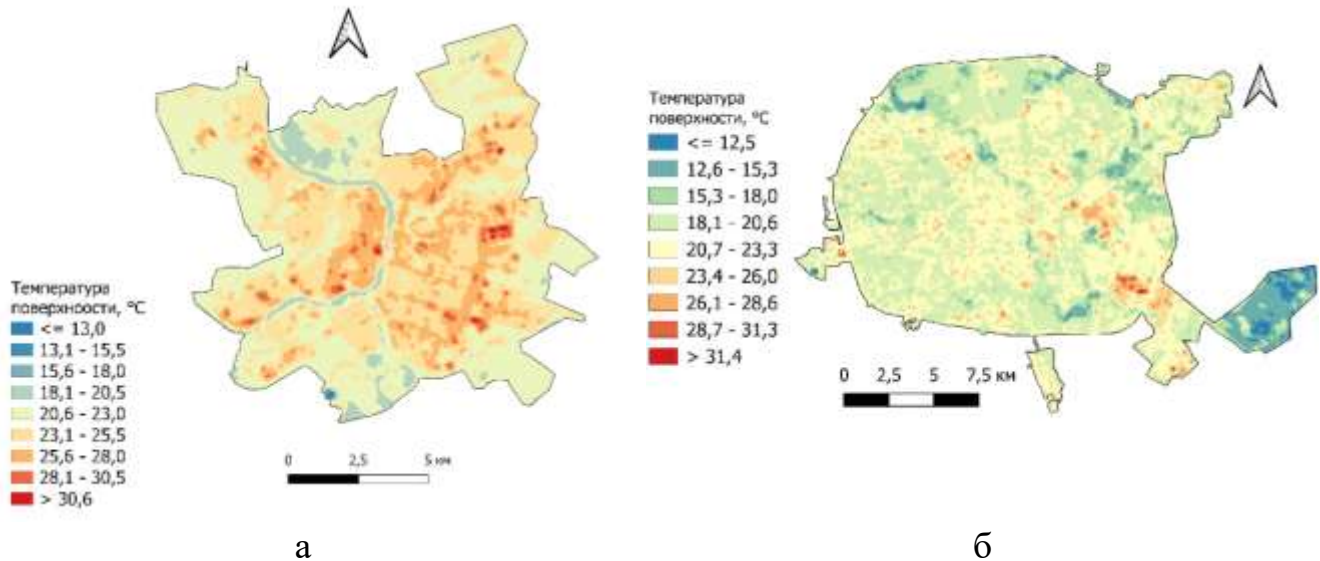


Рисунок 3 – Температура земной поверхности для г.Витебск (а) и г. Минск (б)

Использование Google Earth Engine значительно ускоряет обработку спутниковых снимков и позволяет делать анализ LST более усовершенствованным. Полученные карты LST для крупных городов Беларуси по данным Landsat -8 схожи с результатами прошлых работ [15–16] и являются основой для дальнейших исследований городского микроклимата областных городов Беларуси, а именно, определения локальных климатических зон города [17], индексов комфортности [18], сравнения показаний спутников и наземных приборов, измеряющих LST в городах [19].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas / J. Peng [et al.] // *Remote Sens. Environ.* 2018, Vol. 215. P.255–267.
2. Fu P., Weng Q. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with Landsat imagery // *Remote Sens. Environ.* 2016. Vol. 175. P. 205–214.
3. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources / M.C. Anderson [et al.] // *Remote Sens. Environ.* 2012. Vol. 122. P. 50–65.
4. Analysis of the Relationship between Land Surface Temperature and Wildfire Severity in a Series of Landsat Images / L. Vlassova [et al.] // *Remote Sens.* 2014. Vol. 6. P. 6136–6162.
5. Oke T.R. City size and the urban heat island // *Atmos. Environ.* 1973. Vol. 7. P. 769–779.
6. Гольберг М.А. Климат Минска. Минск.: Вышш. шк., 1976. 288 с.

7. Barbieri T., Despini F., Teggi S. A Multi-Temporal Analyses of Land Surface Temperature Using Landsat-8 Data and Open Source Software: The Case Study of Modena, Italy // Sustainability. 2018. Vol. 10 (5). P. 1678. DOI: [10.3390/su10051678](https://doi.org/10.3390/su10051678).
8. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick [et al.]. // Remote Sens. Environ. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
9. USGS [Electronic resources]. Mode of access: [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov). Date of access 09.11.2021.
10. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product // USGS [Electronic resources]. Mode of access: [www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product](http://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product).
11. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89(4). P. 467–483.
12. Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // Remote Sens. Environ. 1997. Vol. 62. P. 241–252.
13. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series / S.L. Ermida [et al.] // Remote Sens. 2020. Vol. 12. P.1471. DOI : 10.3390/rs12091471.
14. OpenStreetMap [Electronic resources]. Mode of access: <https://www.openstreetmap.org> / Date of access 07.11.2021.
15. Бурченко Г.Д., Прокопчик Е.А., Чумаков Е.А. Изучение теплового поля территории г. Могилева по данным спутника LANDSAT-8 // ГИС-технологии в науках о Земле [Электронный ресурс]: материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 18 нояб. 2020 г. Минск, БГУ, 2020. С. 171–177.
16. Изучение теплового загрязнения г. Минска в летнее и зимнее время года по данным спутника Landsat-8 / Т.В. Шлендер [и др.] // Сахаровские чтения 2021: экологические проблемы XXI века : сборник материалов 21 Международной научной конференции, 20–21 мая 2021. Минск, 2021. С. 379–382.
17. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities / B. Bechtel [et al.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2015. Vol. 4(1). P. 199–219. DOI : [10.3390/ijgi4010199](https://doi.org/10.3390/ijgi4010199).
18. Basarin B., Lukić T., Matzarakis A. Review of Biometeorology of Heatwaves and Warm Extremes in Europe // Atmosphere. 2020. Vol. 11. P. 1276. DOI : 10.3390/atmos11121276.
19. Citizen weather stations data for monitoring applications and urban climate research: an example of Moscow megacity / M.I. Varentsov [et al.]. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 611. P. 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012055.