

УДК 52:551.58(517)

Космический мониторинг астроклиматических условий аймака Хувсгел (Монголия)*

*Н.М. Буднев¹, Н.В. Волков², А.А. Лагутин², Е.Ю. Мордвин², Р.И. Райкин²,
А.И. Ревякин², Р. Тогоо³*

¹Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

²Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

³Институт физики и технологий Монгольской академии наук (Улан-Батор, Монголия)

Satellite Remote Sensing for Monitoring of Astroclimatic Conditions of the Khövsgöl Aimag (Mongolia)*

*N.M. Budnev¹, N.V. Volkov², A.A. Lagutin², E.Yu. Mordvin², R.I. Raikin²,
A.I. Revyakin², R. Togo³*

¹Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

²Altai State University (Barnaul, Russia)

³Institute of Physics and Technology Mongolian Academy of Sciences (Ulan-Bator, Mongolia)

Обсуждается проблема выбора территории для проектирования полномасштабной гамма-обсерватории, обусловленная необходимостью повышения чувствительности и энергетического порога регистрации гамма-квантов существующего комплекса гамма-обсерватории TAIGA.

Проведено исследование астроклиматических условий для выполнения ночных астрофизических наблюдений на территории аймака Хувсгел (Монголия), рассматриваемого в качестве возможного региона размещения полномасштабной гамма-обсерватории. С использованием ночных данных радиометра VIIRS спутниковой платформы Suomi NPP, а также данных гиперспектрометра AIRS спутника Aqua получены пространственные распределения доли безоблачных событий и содержания водяного пара в атмосфере для нескольких периодов активных фаз астрофизических наблюдений.

Анализ спутниковых данных показал, что в качестве возможного региона для размещения полномасштабной гамма-обсерватории с гибридной системой детекторов по топографическим и инфраструктурным критериям наиболее подходит плато озера Хубсугул. Установлено, что средняя за два сезона доля событий с безоблачной атмосферой по данным VIIRS/SNPP для исследуемой территории ~65 %, содержание водяного пара по данным AIRS/Aqua незначительное и составляет 2–2.5 кг/м².

The problem of exploring a territory for designing a full-scale gamma observatory is discussed. It is caused by the need to increase the sensitivity and energy threshold for detecting gamma rays of the existing TAIGA gamma observatory array.

The study of astroclimatic conditions over the territory of the Khövsgöl Aimag (Mongolia) was carried out for the purposes of performing night-time astrophysical observations. Spatial distributions of cloudless events fraction and atmospheric water vapor content were obtained for several periods of active phases of astrophysical observations using the night-time data from the VIIRS instrument onboard Suomi NPP satellite as well as hyperspectrometer AIRS onboard Aqua satellite.

Analysis of satellite data has shown that upon topographic and infrastructure criteria, the plateau of Lake Khuvsgul is the most suitable region for the deployment of a full-scale gamma-ray observatory with a hybrid detector system. According to VIIRS/SNPP data over the territory of interest for two seasons, it was revealed that the average fraction of cloudless events is about 65 % and the atmospheric water vapor content (according to AIRS/Aqua data) is low, amounting to 2–2.5 kg/m².

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-52-44002).

Ключевые слова: гамма-астрономия, обсерватория TAIGA, астроклиматические условия, аймак Хувсгел, маска облачности, содержание водяного пара в атмосфере, радиометр VIIRS/SNPP, гиперспектрометр AIRS/Aqua.

DOI 10.14258/izvasu(2020)4-04

Введение

В последнее десятилетие гамма-астрономия является одним из самых динамично развивающихся направлений астрофизики высоких энергий. Основными предпосылками к развитию являются сравнительно низкий уровень чувствительности существующих в настоящее время гамма-телескопов и, как следствие, предельный энергетический диапазон 100 ГэВ – 20 ТэВ регистрируемых фотонов. Вместе с тем область энергий $E > 100$ ТэВ представляет сегодня наибольший интерес. В ближайшие два года планируется завершить развертывание пилотного комплекса гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) с гибридной системой детекторов [1, 2]. Реализованный на этом комплексе подход, связанный с гибридной методикой регистрации гамма-квантов сверхвысоких энергий, позволит по завершении пилотного этапа достичь чувствительности $10 \div 13$ ТэВ см⁻² с⁻¹, энергетический порог регистрации гамма-квантов составит 100 ТэВ.

Разработанные и развитые на базе пилотного проекта технологии станут основой при проектировании полномасштабной гамма-обсерватории с гибридной системой детекторов на площади 10 км² с недостижимой в обозримом будущем чувствительностью порядка $0 \div 14$ ТэВ см⁻² с⁻¹ для регистрации гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ. К территории расположения полномасштабной гамма-обсерватории, помимо оптимальных географических условий, также предъявляется ряд серьезных требований по содержанию водяного пара и аэрозолей в атмосфере, частоте облачных событий, уровню светового загрязнения.

С учетом приведенных выше требований при проектировании полномасштабной гамма-обсерватории важную роль могут играть данные современных спутниковых систем. Исчерпывающий объем информации об основных метеорологических характеристиках региона предоставляют приборы VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) [3, 4] спутника Suomi NPP, а также AIRS (the Atmospheric Infrared Sounder) [5, 6] спутниковой платформы Aqua [7].

Целью работы является изучение астроклиматических условий для территории аймака Хувсгел (Монголия) с использованием ночных данных спутниковых наблюдений, а также установление зон, подходящих для проведения гамма-астрономических наблюдений.

Key words: gamma-astronomy, TAIGA observatory, astroclimatic conditions, the Khövsgöl Aimag, cloud mask, atmospheric water vapor content, VIIRS/SNPP satellite suite, AIRS/Aqua hyperspectral suite.

Техническая и информационная база

Информационной основой проводимого в работе исследования являются данные радиометра VIIRS спутника Suomi NPP, а также гиперспектрометра AIRS спутниковой платформы Aqua, получаемые станциями УниСкан-24 и ЕОСкан центра космического мониторинга Алтайского госуниверситета в режиме прямого вещания. Собранный архив данных AIRS содержит результаты наблюдений для периода 2002–2020 гг. Данные VIIRS собраны с 2012 г.

Для определения параметров рельефа подстилающей поверхности (ПП) использовались данные цифровой модели местности SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) с пространственным разрешением 90×90 м [8].

Статистическая обработка и постобработка данных выполнялись с использованием ГИС GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) версии 7.2 [9].

Зоны территории аймака Хувсгел, наилучшим образом подходящие для выполнения астрофизических наблюдений, отбирались на основе следующих требований:

- максимальная доля безоблачных событий и низкое содержание водяного пара в атмосфере в периоды активных фаз наблюдений с октября по март;
- высота полигона над уровнем моря от 1500 м;
- угол наклона местности в пределах полигона не более 5°.

Радиометр VIIRS/SNPP

Прибор VIIRS [3, 4], спроектированный в рамках программы исследования Земли из космоса JPSS (Joint Polar Satellite System) [10] и расположенный на спутниковых платформах Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) и NOAA-20, представляет собой 22-канальный сканирующий радиометр, работающий в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

Схема приема и обработки спутниковой информации радиометра VIIRS, реализованная и используемая в Центре, состоит из следующих основных этапов:

- распаковка сырого потока спутниковых данных;
- геолоцирование и калибровка данных;
- построение маски облачности;
- определение измеряемых величин (геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности) по реализованным в центре алгоритмам, интеграция этих данных с ГИС.

Одним из основных источников информации, используемых для достижения поставленной цели, яв-

ляется продукт VIIRS Cloud Mask (маска облачности) алгоритма обработки данных радиометра VIIRS платформы Suomi NPP версии 1.5.08.04 [11].

Алгоритм включает в себя ряд тестов, в которых данные комбинаций каналов VIIRS сравниваются с пороговыми значениями, установленными для конкретного спектрального диапазона. Совместный анализ результатов всех тестов позволяет сделать вывод о наличии облачных структур в конкретном пикселе. Конечный продукт обработки данных VIIRS для каждого пиксела с разрешением 750 метров содержит коэффициент надежности: облачно, вероятно облачно, вероятно ясно или ясно, а также большой объем другой информации.

Гиперспектрометр AIRS/Aqua

Гиперспектрометр AIRS [5, 6] расположен на борту спутника Aqua [7], запущенного в 2002 г. в рамках программы EOS (Earth Observing System) американского аэрокосмического агентства NASA. AIRS является одним из шести основных инструментов платформы Aqua. 2378 каналов этого прибора позволяют регистрировать уходящее длинноволновое излучение в ИК-диапазоне от 3.74 до 15.4 мкм.

При восстановлении вертикальных профилей атмосферы в схеме обработки данных AIRS до 2016 г. использовались данные микроволнового зондировщика AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit) [12]. Совместное использование данных этих двух приборов позволяло восстанавливать атмосферные профили с требуемой точностью даже при 80 % закрытии зоны наблюдения облаками. Выход AMSU-A из строя

в 2016 г. заставил пересмотреть подходы к решению этой задачи. Анализ многолетних наблюдений, проведенный в Центре, показал, что разница между результатами обработки совместных данных AIRS/AMSU-A и данных только AIRS для исследуемой территории составляет ~5%. Таким образом, использование данных только зондировщика AIRS практически не сказывается на надежности получаемых выводов. Так, в работе [13] данные AIRS использовались для восстановления температурных профилей атмосферы в зонах расположения Якутской комплексной установки ШАЛ, а также обсерватории TAIGA.

Для решения задачи восстановления содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы использовался продукт RetStd (only AIRS) алгоритма обработки данных ИК-зондировщика AIRS спутника Aqua версии 6.2.2.0. Результаты обработки получены с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

Результаты

С использованием ночных данных радиометра VIIRS/SNPP установлена доля безоблачных событий для территории аймака Хувсгел для двух сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2017 по март 2018 г. и с октября 2018 по март 2019 г. На рисунке 1 показана средняя доля событий с безоблачной атмосферой, полученная для двух сезонов. Видно, что районы с наибольшей долей безоблачных ночей находятся в основном в высокогорных районах, преимущественно в труднодоступных горных массивах.

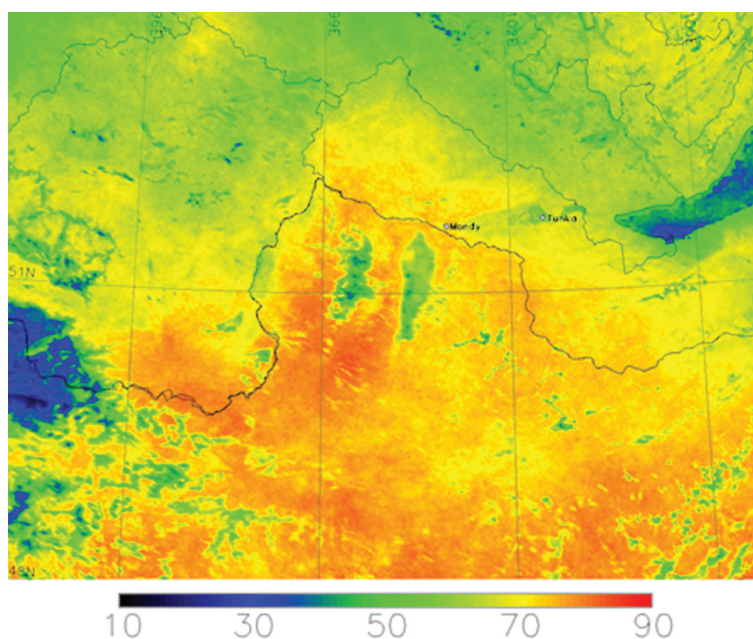


Рис. 1. Средняя доля событий с безоблачной атмосферой по данным VIIRS/SNPP для территории аймака Хувсгел для двух сезонов наблюдений

На рисунке 2 показаны углы уклонов участков подстилающей поверхности (ПП) для территории айма-

ка Хувсгел, полученные по данным цифровой модели местности SRTM.

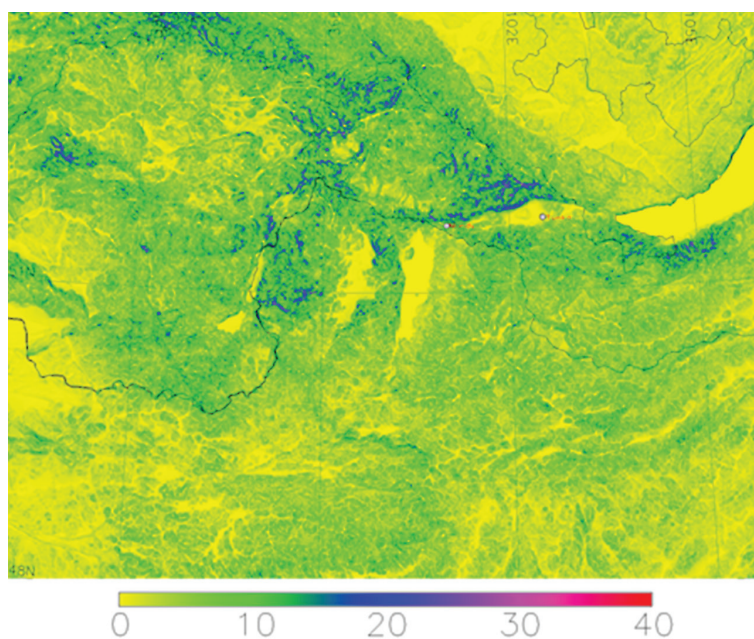


Рис. 2. Уклоны участков (угловые градусы) ПП для территории аймака Хувсгел, полученные по данным цифровой модели местности SRTM

Совместный анализ данных, показанных на рисунках 1 и 2, позволил идентифицировать территории аймака Хувсгел, для которых высота участков ПП больше 1500 м над уровнем моря и угол уклона местности не превышает 5°. На рисунке 3 показаны результаты обработки данных,

удовлетворяющие этим условиям. Видно, что в качестве возможного региона для размещения полномасштабной гамма-обсерватории с гибридной системой детекторов по топографическим и инфраструктурным критериям наиболее подходит плато озера Хубсугул.

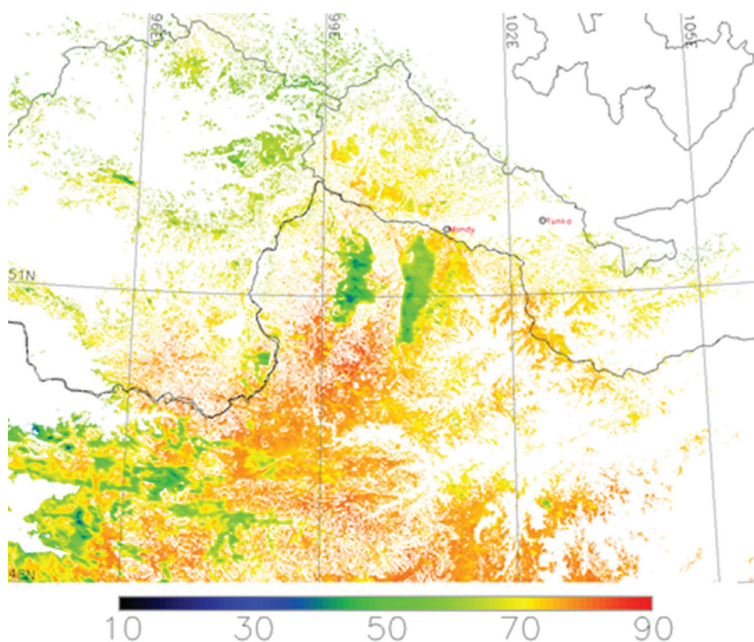


Рис. 3. Средняя доля событий с безоблачной атмосферой по данным VIIRS/SNPP для территории аймака Хувсгел для двух сезонов наблюдений на высотах 1500 м над уровнем моря и уклоном местности не более 5°

По ночным данным гиперспектрометра AIRS/Aqua установлено среднее содержание водяного пара в атмосфере для территории аймака Хувсгел. Результаты

этих расчетов, полученные для 18 сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2002 по март 2020 г., показаны на рисунке 4.

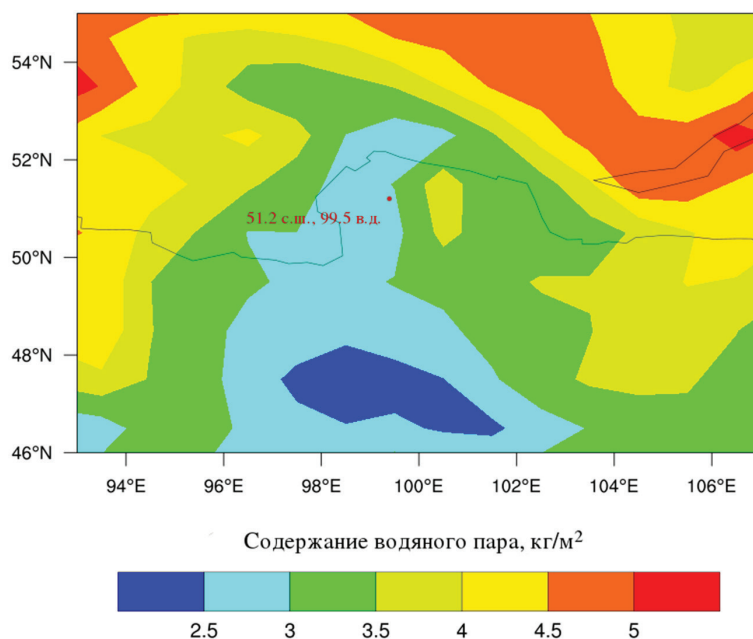


Рис. 4. Среднее содержание водяного пара в атмосфере по данным AIRS/Aqua для территории аймака Хувсгел для 18 сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2002 по март 2020 г. Точкой с координатами отмечена центральная часть плато озера Хубсугул

На рисунке 5 отражены вариации среднемесячных значений содержания водяного пара в атмосфере в центральной точке плато озера Хубсугул (51.2° с.ш., 99.5° в.д.). Видно, что содержание водяного пара в рас-

сматриваемой зоне в периоды с октября по март составляет 3.5–4 кг/м³, в периоды с ноября по март эта оценка меньше почти в два раза — 2–2.5 кг/м³.

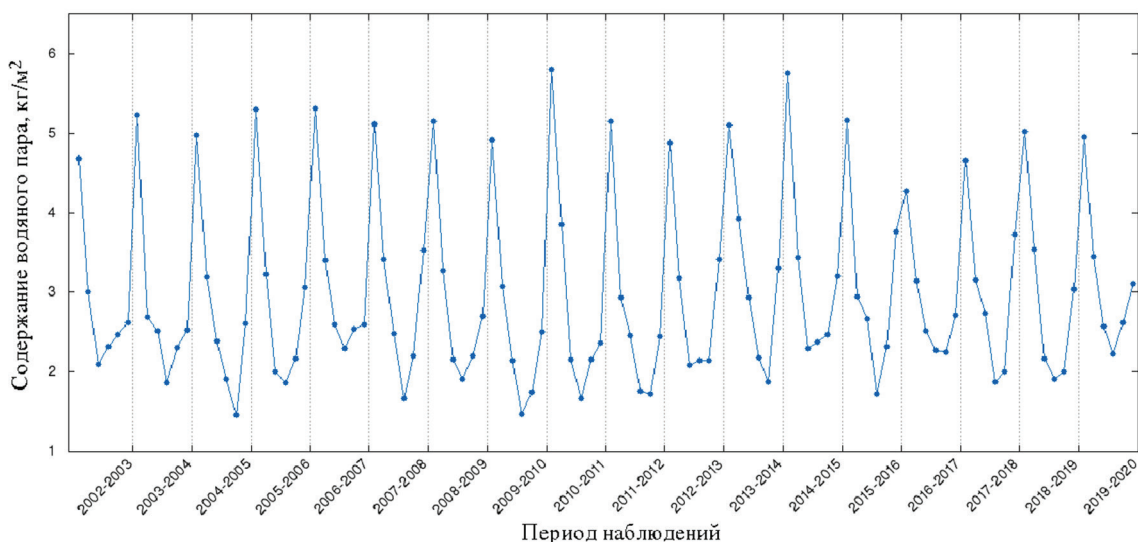


Рис. 5. Вариации среднемесячных значений содержания водяного пара в атмосфере по данным AIRS/Aqua в центральной точке плато озера Хубсугул (51.2° с.ш., 99.5° в.д.) для 18 сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2002 по март 2020 г. Значения, соответствующие разным периодам наблюдений, разделены вертикальными пунктирными линиями

Заключение

Проведено исследование астроклиматических условий для выполнения ночных астрофизических наблюдений на территории аймака Хувсгел. Получено пространственное распределение доли безоблачных событий по ночным данным радиометра VIIRS спутниковой платформы Suomi NPP для двух сезонов гамма-астрономических наблюдений: октябрь 2017 г. — март 2018 г. и октябрь 2018 г. — март 2019 г. По ночным данным гиперспектрометра AIRS/Aqua получено пространственное распределение среднего содержания водяного пара в атмосфере для 18 сезонов наблюдений с октября 2002 по март 2020 г.

В качестве возможного региона для размещения полномасштабной гамма-обсерватории по топографическим и инфраструктурным критериям наиболее подходит плато озера Хубсугул. Значительная часть

этой зоны расположена на высотах больше 1500 м над уровнем моря, что соответствует требованиям, предъявляемым к наземным гамма-астрономическим наблюдениям. Удаленное расположение этого региона от крупных агломераций и промышленных центров приводит к незначительному содержанию аэрозоля в атмосфере и низкому уровню светового загрязнения. Содержание водяного пара в рассматриваемой зоне по данным AIRS/Aqua незначительное и с ноября по март составляет 2–2.5 кг/м³.

Вместе с тем установлено, что доля безоблачных событий в данной зоне в ночное время в сезон наблюдений 2017–2018 гг. составляла около 60 %, в сезон 2018–2019 гг. — до 70 %. Средняя за два сезона доля событий с безоблачной атмосферой по данным VIIRS/SNPP для исследуемой территории ~65 %.

Библиографический список

1. Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. (TAIGA Experiment) TAIGA Gamma Observatory: Status and Prospects // *Physics of Atomic Nuclei*. 2018. Vol. 81. DOI: 10.1134/S1063778818040105.
2. Budnev N.M., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. (TAIGA Experiment) TAIGA-A hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics // *NIM A*. 2020. Vol. 958. DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.067.
3. Efremova B., McIntire J., Moyer D. et al. S-NPP VIIRS thermal emissive bands on-orbit calibration and performance // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. Vol. 119. DOI: 10.1002/2014JD022078.
4. Chang T., Xiong X., Mu Q. VIIRS Reflective Solar Band Radiometric and Stability Evaluation Using Deep Convective Clouds // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2016. Vol. 54. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2594029.
5. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. Vol. 41. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
6. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Лагутин Ал. А. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 2. AIRS // *Вычислительные технологии*. 2007. Т. 12, № 5.
7. Parkinson C.L. Aqua: An Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. Vol. 41. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808319.
8. Reuter H.I., Nelson A., Jarvis A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data // *International Journal of Geographic Information Science*. 2007. Vol. 21. DOI: 10.1080/13658810601169899.
9. Geographic Resources Analysis Support System [Electronic Resource]. URL <https://grass.osgeo.org/>.
10. Zhou L., Divakarla M., Liu X. An Overview of the Joint Polar Satellite System (JPSS) Science Data Product Calibration and Validation // *Remote Sens.* 2016. Vol. 8. DOI: 10.3390/rs8020139.
11. NASA Goddard Space Flight Center's (GSFC) Direct Readout Laboratory (DRL). VIIRS Cloud Mask Science Processing Algorithm. User's Guide, Greenbelt, Maryland, 2018.
12. Lambrigtsen B.H. Calibration of the AIRS microwave instruments // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. Vol. 41. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808247.
13. Lagutin A.A., Mordvin E.Yu., Volkov N.V. Variations of temperature profile of the atmosphere at the locations of Yakutsk EAS array and TAIGA observatory // *Proc. of SPIE*. 2018. Vol. 10833. DOI: 10.1117/12.2504619.