

УДК 520.16

АСТРОКЛИМАТ РАВНИННЫХ ВЫСОКОГОРНЫХ ЗОН БОЛЬШОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО ГАММА-АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2022 г. Е. Ю. Мордвин^{1, *}, Н. В. Волков¹, А. И. Ревякин¹, Р. Тогоо², И. И. Астапов³, П. А. Безъязыков⁴, М. Бланк⁵, Е. А. Бонвеч⁶, А. Н. Бородин⁷, М. Брюкнер⁸, Н. М. Буднев⁴, А. Булан⁶, А. Вайдянатан⁹, Р. Вишневецкий⁸, П. А. Волчугов⁶, Д. М. Воронин¹⁰, А. Ю. Гармаш^{9, 11}, А. Р. Гафаров⁴, В. М. Гребенюк^{7, 12}, О. А. Гресс⁴, Т. И. Гресс⁴, А. А. Гринюк⁷, О. Г. Гришин⁶, А. Н. Дячок⁴, Д. П. Журов⁴, А. В. Загородников⁴, А. Л. Иванова^{9, 4}, Н. Н. Калмыков⁶, В. В. Киндин³, С. Н. Кирюхин⁴, Р. П. Кокоулин³, К. Г. Компаниец³, Е. Е. Коростелева⁶, В. А. Кожин⁶, Е. А. Кравченко^{9, 11}, А. П. Крюков⁶, Л. А. Кузьмичев⁶, А. Кьявасса¹³, А. А. Лагутин¹, Ю. Е. Лемешев⁴, Б. К. Лубсандоржиев¹⁰, Н. Б. Лубсандоржиев⁶, Р. Р. Миргазов⁴, Р. Мирзоян^{14, 6}, Р. Д. Монхоев⁴, Е. А. Осипова⁶, А. Л. Пахоруков⁴, А. Пан⁷, М. И. Панасюк⁶, Л. В. Паньков⁴, А. А. Петрухин³, Д. А. Подгрудков⁶, В. А. Полещук⁴, М. Попеску¹⁵, Е. Г. Попова⁶, А. Порелли^{8, 7}, Е. Б. Постников⁶, В. В. Просин⁶, В. С. Птускин¹⁶, А. А. Пушкин⁴, Р. И. Райкин¹, Г. И. Рубцов¹⁰, Е. В. Рябов⁴, Я. И. Сагань^{7, 12}, В. С. Самолига⁴, Л. Г. Свешникова⁶, А. А. Силаев⁶, А. А. Силаев (мл.)⁶, А. Ю. Сидоренков¹⁰, А. В. Скурихин⁶, М. Слунечка⁷, А. В. Соколов^{9, 11}, Я. В. Суворкин⁴, В. А. Таболенко⁴, А. Б. Танаев⁴, Б. А. Тарашанский⁴, М. Ю. Терновой⁴, Л. Г. Ткачев^{7, 12}, М. Тлучиконт⁵, Н. А. Ушаков¹⁰, Д. Хорнс⁵, Д. В. Чернов⁶, И. И. Яшин³ (коллаборация TAIGA)

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Алтайский государственный университет”, Барнаул, Россия

²Институт физики и технологий Монгольской академии наук, Улан-Батор, Монголия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики,
Иркутск, Россия

⁵Университет Гамбурга, Институт экспериментальной физики, Гамбург, Германия

⁶Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелевича, Москва, Россия

⁷Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁸Немецкий электронный синхротрон, Гамбург, Германия

⁹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

¹⁰Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

¹²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

¹³Физический факультет Университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

¹⁴Институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹⁵Институт космических наук, Бухарест, Румыния

¹⁶Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: zion0210@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

С использованием ночных данных радиометра VIIRS спутниковой платформы Suomi NPP и данных гиперспектрометра AIRS спутника Aqua проведено исследование астроклиматических условий для выполнения ночных астрофизических наблюдений на территории региона Большой Алтай. Установлено, что по топографическим и астроклиматическим критериям для размещения полномасштабного гамма-астрономического эксперимента наиболее подходят район Чуйской степи (Республика Алтай, Россия) и плато озера Хубсугул (аймак Хувсгел, Монголия). Учет особенностей инфраструктуры делает предпочтительным полигон в западной части Чуйской степи.

DOI: 10.31857/S0367676522030188

ВВЕДЕНИЕ

В последние двадцать лет гамма-астрономия стала самым динамично развивающимся направлением астрофизики элементарных частиц и физики высоких энергий, в рамках которого получены принципиально важные результаты о процессах с гигантским выделением энергии (см., например, [1]). Активно расширяется экспериментальная база по регистрации гамма-излучения сверхвысоких энергий. Наряду с крупнейшими мировыми наземными гамма-обсерваториями HAWC, MAGIC, HESS, VERITAS, на территории Российской Федерации в стадии завершения находится строительство первой очереди гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), занимающей площадь 1 км² [2, 3]. Уникальная гибридная система детекторов и методика регистрации гамма-квантов сверхвысоких энергий, реализованная в рамках проекта TAIGA, по завершении пилотного этапа позволят достичь наивысшей на данный момент чувствительности для регистрации гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Вместе с тем дальнейшее увеличение чувствительности требует проектирования и ввода в эксплуатацию полномасштабной гамма-обсерватории с гибридной системой детекторов площадью не менее 10 км².

Использование оптических черенковских телескопов в системе детекторов, размещенных на большой площади, подразумевает, что территория расположения гамма-обсерватории должна удовлетворять ряду критериев. Необходимыми условиями являются низкое содержание атмосферного водяного пара и малая аэрозольная оптическая толщина, высокая доля безоблачных событий в году, минимальный уровень светового загрязнения и др. Снижения влияния указанных факторов на качество оптических наблюдений можно достичь выбором оптимальной по географическим (высота полигона над уровнем моря, рельеф местности) и астроклиматическим условиям территории для размещения полномасштабной гамма-обсерватории. Перспективным подходом при решении комплексной проблемы

проектирования полномасштабной гамма-обсерватории является использование для первичного анализа географических и астроклиматических характеристик территории данных современных спутниковых систем. Так полный перечень продуктов по основным характеристикам атмосферы региона предоставляют пакеты обработки данных радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) [4, 5] спутников Suomi NPP и NOAA-20, а также гиперспектрометра AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) [6, 7] спутниковой платформы Aqua [8].

Целью настоящей работы является анализ астроклиматических условий региона Большого Алтая (трансграничная территория в пределах Алтайских гор) и установление конкретных зон, оптимальных для проведения гибридных гамма-астрономических наблюдений, с использованием данных космического дистанционного зондирования.

ТЕХНИЧЕСКАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА

Основными источниками информации, используемыми в настоящей работе, являются данные радиометра VIIRS, расположенного на борту спутников Suomi NPP и NOAA-20, а также гиперспектрального комплекса AIRS спутниковой платформы Aqua, принимаемые станциями УниСкан-24 и ЕОСкан центра космического мониторинга Алтайского государственного университета в режиме прямого вещания. Анализ астроклиматических условий проводится по результатам наблюдений за период 2002–2020 гг. (AIRS) и 2012–2020 гг. (VIIRS).

Топографические условия определялись с использованием данных радиолокационной топографической миссии шаттла SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), имеющих пространственное разрешение 90 × 90 м [9].

В качестве возможных зон территории Большого Алтая для выполнения астрофизических наблюдений выбирались те участки, для которых по

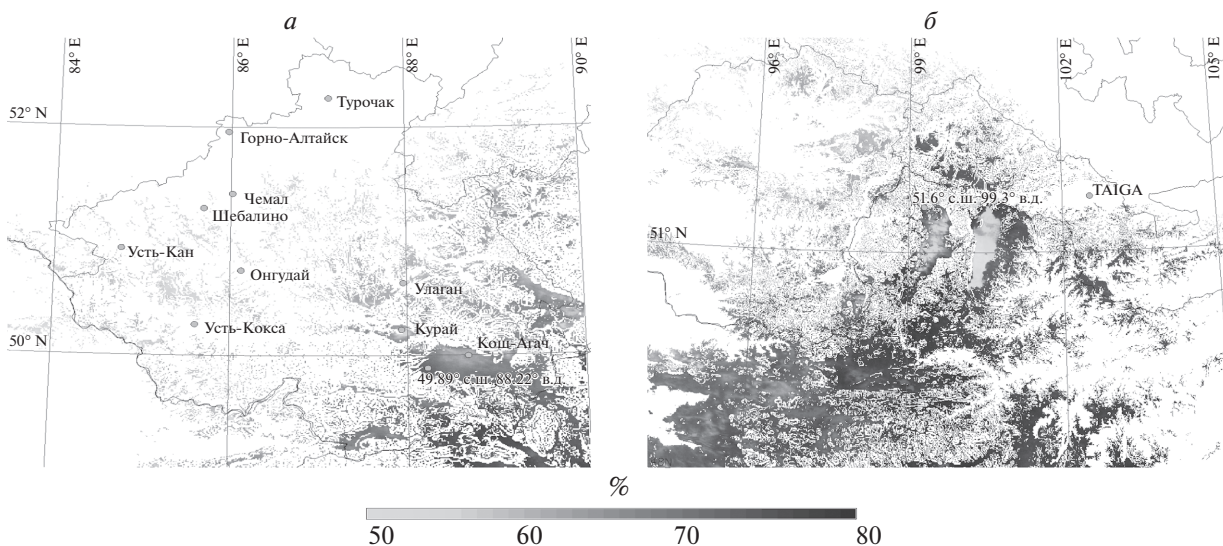


Рис. 1. Средняя доля событий (в процентах) с безоблачной атмосферой для территории Республики Алтай (а) и района плато озера Хубсугул (б) по данным ночных измерений VIIRS/SNPP для восьми сезонов наблюдений с октября 2012 г. по март 2020 г. на высотах свыше 1500 м над уровнем моря и уклоном местности не более 5° .

данным спутниковых наблюдений установлена минимальная доля облачных событий и относительно низкое содержание водяного пара в атмосфере в периоды активных фаз ночных наблюдений, проводимых с октября по март. Полигоны с высотой местности над уровнем моря ниже 1500 м и углом уклона поверхности в пределах полигона более 5° исключались из исследования.

Радиометр VIIRS/SNPP/NOAA-20

Прибор VIIRS был разработан в рамках исследовательской программы NASA JPSS (Joint Polar Satellite System) [10]. В настоящее время в эксплуатации находятся два прибора, расположенные на спутниках Suomi NPP и NOAA-20. Данный прибор является 22-канальным сканирующим радиометром, производящим съемку Земли в видимом и ИК-диапазонах.

Для получения информации о наличии в атмосфере облачных структур использовался продукт VIIRS CloudMask (маска облачности) [11], создаваемый в алгоритме обработки данных VIIRS версии 1.5.08.04.

Гиперспектрометр AIRS/Aqua

ИК-зондировщик AIRS расположен на спутниковой платформе Aqua, выведенной на орбиту Земли в 2002 г. в рамках научно-исследовательской программы NASA/EOS (Earth Observing System). Регистрация уходящего из атмосферы Земли длинноволнового ИК-излучения в диапазоне длин волн от 3.74 до 15.4 мкм осуществляется 2378 каналами прибора.

Для восстановления содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы использовался продукт RetStd (AIRS only), получаемый в версии 6.2.2.0 алгоритма обработки данных AIRS с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием ночных данных радиометра VIIRS/SNPP установлена доля безоблачных событий для территории региона Большого Алтая для восьми сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2012 г. по март 2020 г. Результат анализа измерений VIIRS и данных цифровой модели местности, представленный на рис. 1, позволил выделить районы с максимальной долей безоблачных событий при выполнении критериев высоты над уровнем моря (свыше 1500 м) и угла уклона местности (не более 5°).

Также по данным ночных измерений гиперспектрометра AIRS/Aqua получены средние оценки содержания водяного пара в атмосфере исследуемых зон. На рис. 2 показаны результаты этих расчетов, полученные в результате обработки архива спутниковых данных для 18 сезонов (с 2002 по 2020 г.). Анализировались данные для периодов активных фаз ночных наблюдений с октября по март.

Совместный анализ всей совокупности данных показывает, что наиболее подходящими для размещения полномасштабной гамма-обсерватории районами являются участки в западной части Чуйской степи (Республика Алтай, Россия) вблизи населенного пункта Кош-Агач (49.89° с. ш.,

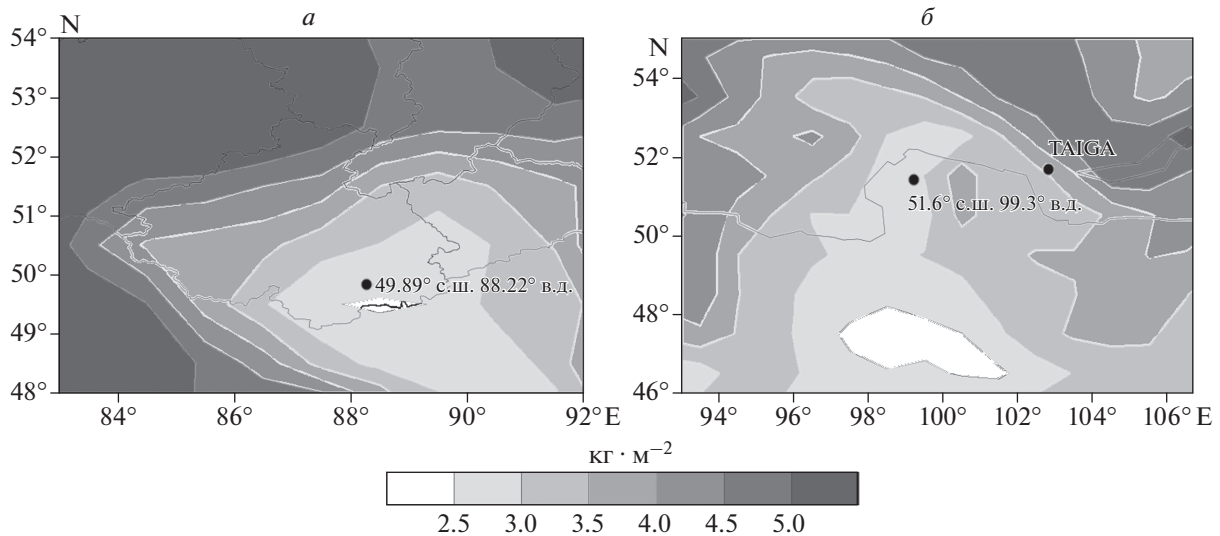


Рис. 2. Усредненное содержание водяного пара ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$) в атмосфере ночью по данным AIRS/Aqua для территории Республики Алтай (а) и района плато озера Хубсугул (б) для 18 сезонов наблюдений с октября 2002 г. по март 2020 г.

88.22° в. д.) и плато озера Хубсугул (аймак Хувсгел, Монголия) (51.6° с. ш., 99.3° в. д.). Здесь доля безоблачных событий равна соответственно 73 и 67%, содержание водяного пара незначительно и составляет $1.5\text{--}3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$.

При этом следует отметить, что Чуйская степь является более предпочтительным регионом для размещения эксперимента в связи с лучшей транспортной доступностью и наличием необходимых объектов инфраструктуры.

Данные результаты подтверждают предварительные выводы, сделанные в нашей работе [12] с использованием данных VIIRS за два сезона (2019–2020 гг.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование астроклиматических условий региона Большого Алтая с целью первичного определения зон, наиболее подходящих для размещения полномасштабной гамма-астрономической обсерватории. По ночным данным радиометра VIIRS/Suomi NPP получено пространственное распределение доли безоблачных событий для восьми сезонов гамма-астрономических наблюдений с октября 2012 г. по март 2020 г. Дополнительно анализировалось пространственное распределение среднего содержания водяного пара в атмосфере исследуемых зон для 18 сезонов наблюдений с октября 2002 г. по март 2020 г. Отбирались полигоны с высотой местности над уровнем моря не менее 1500 м и углом уклона поверхности в пределах 5° на площади свыше 10 км^2 .

Установлено, что в качестве возможных зон для размещения полномасштабной гамма-обсерватории по топографическим и астроклиматиче-

ским критериям наиболее подходят зоны в западной части Чуйской степи, а также плато озера Хубсугул. Удаленное расположение данных территорий от крупных агломераций и промышленных центров приводит к низкому уровню аэрозольного и светового загрязнения атмосферы. Средняя оценка содержания водяного пара в атмосфере рассматриваемых зон по данным AIRS/Aqua низкая и для периода с октября по март составляет $1.5\text{--}3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. При этом доля безоблачных событий в районах Чуйской степи и плато озера Хубсугул согласно ночным измерениям VIIRS/SNPP за период с октября 2012 г. по март 2020 г. составляет 73 и 67% соответственно. Учет инфраструктурных особенностей (транспортная доступность, возможности по организации энергоснабжения, близость сельского поселения Кош-Агач и др.) делает более предпочтительным полигон в западной части Чуйской степи.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-44002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Di Sciascio G. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1263. Art. No. 012003.
2. Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Ядерн. физ. 2018. Т. 81. № 4. С. 469; Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezъazykov P.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. V. 81. P. 497.
3. Буднев Н.М., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 81. № 8. С. 1049; Budnev N.M., Astapov I.I., Bezъazykov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 951.
4. Hillger D., Kopp T., Lee T. et al. // VAMS. 2013. V. 94. P. 1019.

5. Zhou L., Divakarla M., Liu X. et al. // Remote Sens. 2019. V. 11. Art. No. 698.
6. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. P. 253.
7. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Лагутин Ал. А. и др. // Выч. технол. 2007. Т. 12. № 5. С. 78.
8. Parkinson C.L. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. P. 173.
9. Reuter H.I., Nelson A., Jarvis A. // IJGIS. 2007. V. 21. P. 983.
10. Goldberg M.D., Kilcoyne H., Cikanek H., Mehta A. // J. Geophys. Res. Atm. 2013. V. 118. Art. No. 13463.
11. Kopp T.J., Thomas W., Heidinger A.K. et al. // J. Geophys. Res. Atm. 2014. V. 119. P. 2441.
12. Буднев Н.М., Волков Н.В., Лагутин А.А. и др. // Изв. Алтайск. гос. ун-та. 2020. № 4(114). С. 27.

Astroclimate of plain high mountain zones in the greater Altai according to satellite remote sensing data: potential for placing a full-scale gamma-astronomy experiment

E. Yu. Mordvin^{a,*}, N. V. Volkov^a, A. I. Revyakin^a, R. Togoo^b, I. I. Astapov^c, P. A. Bezyazeev^d, M. Blank^e, E. A. Bonvech^f, A. N. Borodin^g, M. Bruchner^h, N. M. Budnev^d, A. Bulan^f, A. Vaidyanathanⁱ, R. Wischnewski^h, P. A. Volchugov^f, D. M. Voroninⁱ, A. Yu. Garmash^{i,k}, A. R. Gafarov^d, V. M. Grebenyuk^{g,l}, O. A. Gress^d, T. I. Gress^d, A. A. Grinyuk^g, O. G. Grishin^f, A. N. Dyachok^d, D. P. Zhurov^d, A. V. Zagorodnikov^d, A. L. Ivanova^{d,i}, N. N. Kalmykov^f, V. V. Kindin^c, S. N. Kiryuhin^d, R. P. Kokoulin^c, K. G. Kompaniets^c, E. E. Korosteleva^f, V. A. Kozhin^f, E. A. Kravchenko^{i,k}, A. P. Kryukov^f, L. A. Kuzmichev^f, A. Chiavassa^m, A. A. Lagutin^a, Yu. E. Lemeshev^d, B. K. Lubsandorzhiyev^j, N. B. Lubsandorzhiyev^f, R. R. Mirgazov^d, R. Mirzoyan^{f,n}, R. D. Monkhoev^d, E. A. Osipova^f, A. L. Pakhorukov^d, A. Pan^g, M. I. Panasyuk^f, L. V. Pankov^d, A. A. Petrukhin^c, D. A. Podgrudkov^f, V. A. Poleschuk^d, M. Popescu^o, E. G. Popova^f, A. Porelli^{g,h}, E. B. Postnikov^f, V. V. Prosin^f, V. S. Ptuskin^p, A. A. Pushnin^d, R. I. Raikin^a, G. I. Rubtsov^j, E. V. Ryabov^d, Y. I. Sagan^{g,l}, V. S. Samoliga^d, L. G. Sveshnikova^f, A. A. Silaev^f, A. A. Silaev, Jr.^f, A. Yu. Sidorenkov^j, A. V. Skurikhin^f, M. Slunicka^g, A. V. Sokolov^{i,k}, Ya. V. Suvorkin^d, V. A. Tabolenko^d, A. B. Tanaev^d, B. A. Tarashansky^d, M. Yu. Ternovoy^d, L. G. Tkachev^{g,l}, M. Tluczykont^e, N. A. Ushakov^j, D. Horns^e, D. V. Chernov^f, I. I. Yashin^c (TAIGA collaboration)

^a Altai State University, Barnaul, 656049 Russia

^b Institute of Physics and Technology Mongolian Academy of Sciences, Ulan-Bator, 210651 Mongolia

^c National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^d Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

^e Institute of Experimental Physics, University of Hamburg, Hamburg, 22761 Germany

^f Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (of the Moscow State University), Moscow, 119991 Russia

^g Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^h German Electron Synchrotron (DESY), Hamburg, 22607 Germany

ⁱ Novosibirsk National Research University, Novosibirsk, 630090 Russia

^j Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

^k Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^l Dubna State University, Dubna, 141982 Russia

^m Department of Physics University of Turin and National Institute for Nuclear Physics (INFN), Turin, 10125 Italy

ⁿ Max Plank Institute, Munich, 80539 Germany

^o Institute of Space Sciences, Bucharest, 077125 Romania

^p Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere, and Radiowave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

*e-mail: zion0210@gmail.com

A study of astroclimatic conditions for performing nighttime astrophysical observations on the territory of the Greater Altai, considered as a possible region for the location of a full-scale gamma-ray observatory, has been carried out. Using the nighttime data of the VIIRS radiometer of the Suomi NPP satellite platform, as well as data from the AIRS hyperspectrometer of the Aqua satellite, the spatial distributions of the fraction of cloudless events and the water vapor content in the atmosphere were obtained for several periods of active phases of astrophysical observations. It was found that, according to topographic and astroclimatic criteria, the Chuya Steppe region (Altai Republic, Russia) and the Khuvsgol lake plateau (Khuvsgel aimag, Mongolia) are most suitable for placing a full-scale gamma-astronomical experiment. The site in the western part of the Chuya Steppe is preferable when considering the features of the infrastructure.