

МРНТИ 29.05.45

<https://doi.org/10.26577/JPEOS20252717>**А.Б. Андреев*, Е.Е. Щербулова**

ТОО «Институт Ионосферы», Алматы, Казахстан

*e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru

СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О СОБЫТИЯХ GLE

В статье представлено описание разработанной системы оперативного оповещения о событиях наземных возрастаний (Ground Level Enhancement, GLE), вызванных увеличением потока солнечных космических лучей высокой энергии. Разработанная система интегрирует данные международной сети нейтронных мониторов (NMDB) и рентгеновских сенсоров спутников GOES, анализируя их в режиме реального времени. Основные компоненты системы включают автоматизированную загрузку данных, обработку временных рядов и генерацию алертных сигналов при обнаружении значительных изменений радиационной обстановки. Применение предложенных алгоритмов позволяет минимизировать ложные срабатывания и оперативно выявлять угрозы для орбитальных космических аппаратов, такие как повреждение электроники или деградация солнечных панелей. Тестирование системы на реальных событиях, включая GLE №73 – 76, подтвердило её высокую эффективность и надёжность. Разработка направлена на повышение устойчивости космической инфраструктуры к воздействиям экстремальной космической погоды, включая события повышенной радиационной активности. Полученные результаты обладают прикладным потенциалом для создания интегрированных систем мониторинга и прогноза радиационной обстановки в околоземном пространстве. Предложенный алгоритмический подход отличается гибкостью и может быть масштабирован на другие классы радиационных угроз, включая аномальные солнечные события и эффекты фоновое излучения. Внедрение такой системы способствует повышению уровня ситуационной осведомлённости и усилению мер радиационной защиты орбитальных аппаратов и наземных объектов, критически зависящих от стабильности космической среды.

Ключевые слова: GLE, солнечные космические лучи, NMDB, нейтронные мониторы, прогнозирование.

A.B. Andreyev*, Y.E. Chsherbulovala

LLP «Institute of Ionosphere», Almaty, Kazakhstan

*e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru

GLE event warning system

The article describes the developed system of operational notification of ground Level Enhancement (GLE) events caused by an increase in the flux of high-energy solar cosmic rays. The developed system integrates data from the international network of neutron monitors (NMDB) and X-ray sensors of the GOES satellites, analyzing them in real time. The main components of the system include automated data loading, time series processing, and generation of alert signals when significant changes in the radiation environment are detected. The use of the proposed algorithms makes it possible to minimize false alarms and quickly identify threats to orbiting spacecraft, such as damage to electronics or degradation of solar panels. Testing of the system on real events, including GLE №73 – 76, confirmed its high efficiency and reliability. The development is aimed at enhancing the resilience of space infrastructure to the impacts of extreme space weather, including episodes of elevated radiation activity. The obtained results have practical potential for the creation of integrated systems for monitoring and forecasting the radiation environment in near-Earth space. The proposed algorithmic approach is adaptable and scalable to other categories of radiation threats, including abnormal solar phenomena and background radiation effects. The implementation of such a system contributes to improved situational awareness and the reinforcement of radiation protection measures for both orbital assets and ground-based facilities that are critically dependent on the stability of the space environment.

Key words: GLE, solar cosmic rays, NMDB, neutron monitors, forecasting.

А.Б. Андреев*, Е.Е. Щербулова
«Ионосфера Институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан
*e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru

GLE оқиғалар туралы ескерту жүйесі

Мақалада жоғары энергиялы күн ғарыштық сәулелерінің көбеюінен туындаған жердегі өсу оқиғалары (Ground Level Enhancement, GLE) туралы жедел ескерту жүйесінің сипаттамасы келтірілген. Өзірленген жүйе халықаралық нейтрондық мониторлар желісінің (NMDB) және GOES спутниктік рентгендік сенсорлардың деректерін нақты уақыт режимінде талдай отырып біріктіреді. Жүйенің негізгі компоненттеріне деректерді автоматтандырылған жүктеу, уақыт қатарларын өңдеу және радиациялық ортаның айтарлықтай өзгерістері анықталған кезде алерт сигналдарын жасау кіреді. Ұсынылған алгоритмдерді қолдану жалған позитивтерді азайтуға және орбиталық ғарыш аппараттарына электрониканың зақымдануы немесе күн панельдерінің деградациясы сияқты қауіптерді тез анықтауға мүмкіндік береді. Жүйені нақты оқиғаларға, соның ішінде GLE №73 – 76-ға тестілеу оның жоғары тиімділігі мен сенімділігін растады. Даму ғарыштық инфрақұрылымның экстремалды ғарыштық ауа-райының әсеріне, соның ішінде радиациялық белсенділіктің жоғарылау оқиғаларына төзімділігін арттыруға бағытталған. Алынған нәтижелер жерге жақын кеңістіктегі радиациялық жағдайды бақылау мен болжаудың интеграцияланған жүйелерін құру үшін қолданбалы әлеуетке ие. Ұсынылған алгоритмдік тәсіл икемділікпен ерекшеленеді және оны басқа радиациялық қауіптер кластарына, соның ішінде аномальды күн оқиғалары мен фондық сәулелену әсерлеріне масштабтауға болады. Мұндай жүйені енгізу ситуациялық хабардарлық деңгейін арттыруға және ғарыштық ортаның тұрақтылығына өте тәуелді орбиталық аппараттар мен жердегі объектілерді радиациялық қорғау шараларын күшейтуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: GLE, күн ғарыштық сәулелері, NMDB, нейтрондық мониторлар, болжау.

Введение

Повышенный уровень электромагнитного и ионизирующего излучения является одним из основных факторов космического пространства, вызывающих преждевременный выход из строя космических аппаратов [1]. При этом уровень излучения в околоземном космическом пространстве является сильно меняющейся величиной, кратковременно увеличивающейся на несколько порядков в периоды солнечных вспышек. Одним из способов повышения надежности и безопасности функционирования космической техники является принятие специальных активных мер защите космических аппаратов в периоды повышенного уровня радиации [2]. К таким мерам относятся перевод космических аппаратов в режим пониженного энергопотребления, исключение важных процедур на этот период, таких как маневрирование аппарата, прием управляющей информации и других, способных привести к необратимым последствиям в случае временного нарушения работоспособности космического аппарата или связи. Для реализации таких активных мер защиты необходимо точное и достоверное прогнозирование периодов опасного повышения радиационной обстановки на орбитах космических аппаратов.

Одним из наиболее опасных явлений является большое протонное возрастание, вызванное выбросом солнечных частиц высоких энергий

(SEP – Solar energetic particle) [3]. Эти частицы способны проникать в верхние слои атмосферы Земли и представляют угрозу для космических аппаратов, вызывая повреждение электроники. Важным индикатором большого протонного возрастания является событие наземного возрастания космических лучей (Ground Level Enhancement, GLE) [4]. Однако сами по себе события GLE не являются непосредственной угрозой, а лишь фиксирует факт значительного увеличения потока солнечных космических лучей высоких энергий, регистрируемого на поверхности Земли. Опасность заключается именно в большом протонном возрастании, сопровождающем это явление, так как оно приводит к интенсивному воздействию высокоэнергичных частиц на объекты околоземном космическом пространстве и на авиацию, особенно в высокоширотных регионах.

Идея краткосрочного прогнозирования событий протонных возрастаний на основе регистрации событий GLE, предложенная в [5], основывается на том, что относительно небольшое число релятивистских протонов вызывающих GLE имеют большую энергию, и соответственно доходят до Земли раньше более многочисленных, но менее энергичных протонов, вносящих основной вклад в протонные возрастания в ОКП. При этом, наблюдение GLE на нескольких нейтронных мониторах будет с вероятностью близкой к 100 процентам сопровождаться про-

тонным возрастанием в ОКП [6], поскольку геоэффективность протонов всего диапазона энергий будет примерно одинаковой. На сегодня в мире функционирует несколько алертных систем предупреждения о начале большого протонного возрастания, основанных на описанном принципе и использующих данные международной сети нейтронных мониторов. Наиболее признанными и точными являются система оповещения Университета Бартола, США [2], система оповещения ИЗМИРАН, Россия [7] и системы оповещения GLE Alert++ Афинской группы космических лучей [5].

Для регистрации событий GLE традиционно используются наземные нейтронные мониторы, фиксирующие вторичные частицы, образующиеся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли. Данные нейтронных мониторов централизованно собираются и предоставляются сетью NMDB [<https://www.nmdb.eu/station/>]. Эти данные дополняются информацией о рентгеновском излучении Солнца, предоставляемой спутниками серии GOES, что позволяет более точно идентифицировать начало крупных протонных возрастаний.

Первое зарегистрированное ионизационными камерами событие GLE было зафиксировано 28 февраля 1942 года, а последнее на данный момент зарегистрированное событие произошло 21 ноября 2024 года, получив номер 76. В среднем на год приходится одно событие GLE, однако их распределение во времени неравномерно, что усложняет их прогнозирование[8].

К факторам снижающим эффективность алертных систем GLE, повышающим число ложных срабатываний и понижающим вероятность детектирования событий GLE относятся технические помехи в оперативных данных нейтронных мониторов и Форбуш-эффекты (Forbush Decrease, FD) – кратковременные, но существенные уменьшения потока галактических космических лучей, вызванные прохождением солнечных корональных выбросов массы (CME) и связанных с ними магнитных облаков[9]. Форбуш-эффекты зачастую сопровождают события GLE, дополняя их динамическую картину[10]. На фазе восстановления потока космических лучей после форбуш-эффектов возможны ложные срабатывания алертной системы.

В рамках создания Казахской системы космической ситуационной осведомленности 2021-2023 гг., в ТОО Институт ионосферы была создана собственная алертная система о начале протонных возрастаний. Основная цель разра-

ботки данной системы – создание программного решения, способного в режиме реального времени выявлять начало событий GLE и формировать оперативные алертные сигналы о предстоящем большом протонном возрастании, для минимизации рисков повреждения казахстанских космических аппаратов. Реализация системы позволит повысить уровень безопасности космических миссий, обеспечив своевременное реагирование на изменения радиационной обстановки. В настоящей работе приводится описание принципов работы данной системы и приводятся примеры последних детектированных событий GLE.

Материалы и методы

В основе логики работы системы лежит алгоритм детектирования SEP предложенный в [1]. Система основана на использовании данных международной сети нейтронных мониторов NMDB (<https://www.nmdb.eu/station/>), в том числе казахстанского нейтронного монитора AATB NM-64, расположенного на высоте 3340 м. над уровнем моря на экспериментальном комплексе ТШВНС, Алматы, а так же данных спутников серии GOES (<https://www.noaa.gov/>). NMDB предоставляет стандартизированные данные о потоках космических лучей, регистрируемых нейтронными мониторами по всему миру[11] [12]. Используются данные таких станций, как SOPO, FSMT, AATB, APTY, ATHN, CALG, KERG, OULU, SNAE, DOMC, DOMB, SOPB, TERA и THUL. Эти станции были выбраны за их оперативность, высокое качество данных и расположение в ключевых географических точках, что позволяет регистрировать изменения потоков космических частиц в различных широтах. Используются скорректированные на атмосферное давление и эффективность данные с временным разрешением 1 минута, что обеспечивает возможность анализа в режиме реального времени. Данные рентгеновского излучения Солнца с сенсоров «GOES X-ray Sensor (XRS)» спутников GOES-16, GOES-17 и GOES-18 [13] а так же интегральные потоки протонов энергий 1, 10 и 100 МэВ загружаются с серверов NOAA [data.ngdc.noaa.gov]. Для хранения и обработки данных была разработана база данных MySQL [14] под названием alert_db. Она включает структурированные таблицы, содержащие данные нейтронных мониторов, рентгеновского излучения, потока высокоэнергичных протонов и событий GLE.

Для получения оперативных данных с серверов NMDB и NOAA разработана подсистема сбора данных, предназначенная для поиска, загрузки, верификации данных, заполнения локальной базы оперативных данных, а так же загрузки архивных данных. Подсистема состоит

из набора служебных программ и скриптов, а так же файлов описания параметров источников данных и форматов данных.

На рисунке 1 изображена схема взаимодействия системы генерации алертного сигнала и ее компонентов.

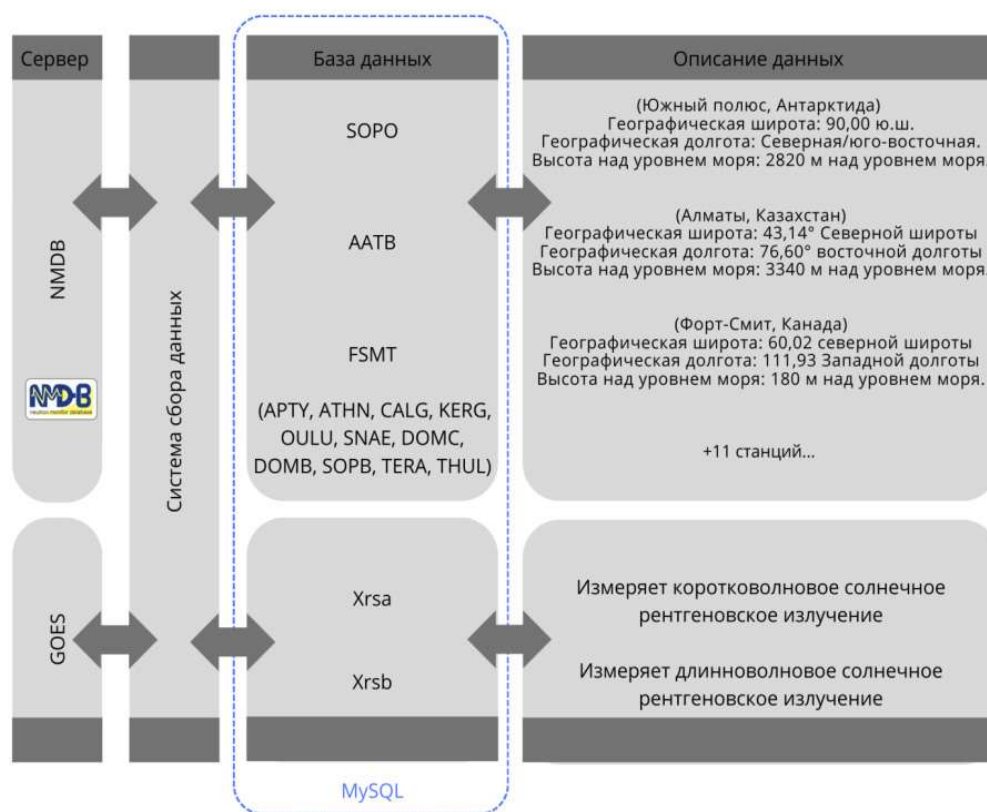


Рисунок 1 – Схема организации системы генерации алертного сигнала, и взаимодействия ее компонентов

Для реализации системы генерации алертного сигнала использованы современные технологии разработки программного обеспечения. Система базируется на использовании только программных компонентов со свободным исходным кодом (Open source software). Основным языком программирования при реализации системы является язык Python версии 3. Графический интерфейс разрабатываемой системы генерации алертного сигнала создан в виде веб-приложения, размещенного на сайте проекта. Так же разработан графический веб-интерфейс для базы оперативных и архивных данных.

Методика разработки и реализации системы генерации алертного сигнала основана на анализе данных нейтронных мониторов и рентге-

новского излучения Солнца. Ключевая задача заключалась в создании алгоритма, способного эффективно обрабатывать входные данные, устранять влияние пропусков и помех, а также оперативно выявлять события наземных возрастаний (GLE) [7]. Для этого использовались современные подходы к обработке временных рядов и автоматизации процессов анализа. Основная проблема связана с обеспечением корректной обработки данных в условиях их возможной задержки или частичной недоступности. Для решения этой проблемы была реализована проверка наличия данных в двух временных окнах: первое окно охватывает интервал в 120–60 минут до текущего времени и требует наличия не менее 50 минут непрерыв-

ных данных, второе – последние 5 минут, которые должны быть представлены полностью. Данные, прошедшие проверку, направляются в алгоритм анализа событий GLE. Алгоритм работы системы выполняется автоматически с интервалом в 1 минуту. Он анализирует данные за последние 120 минут, идентифицируя события, связанные с увеличением потока космических частиц или рентгеновского излучения.

Это позволяет учитывать возможные задержки в поступлении информации, вызванные удалённостью станций нейтронных мониторов или сбоями в каналах передачи данных. Если уровни, зафиксированные нейтронными мониторами или спутниками GOES, превышают заданные пороговые значения, система формирует алертный сигнал и передаёт его для дальнейшего анализа и визуализации[14].

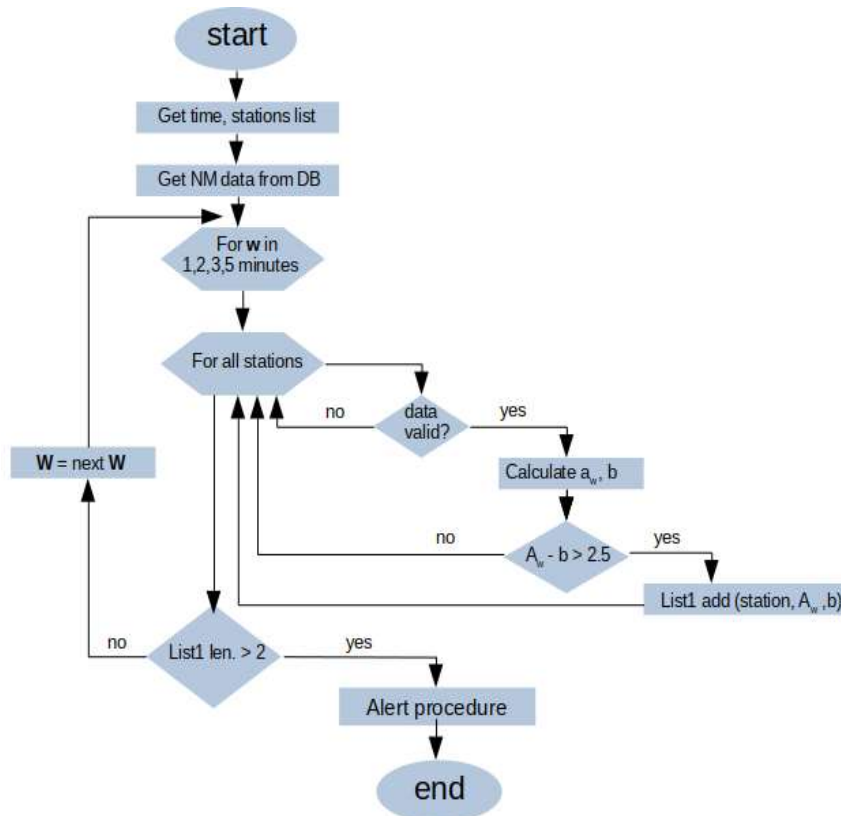


Рисунок 2 – Блок-схема работы алгоритма поиска сигнала наземного возрастания по данным нейтронных мониторов

Результаты

На рисунке 3 приведена веб-страница системы алертной системы. Страница содержит информацию о текущем уровне алертного сигнала: GLE Warning – детектировано возрастание одновременно по двум станциям нейтронных мониторов, GLE Alert – детектировано возрастание одновременно по трем и более станциям нейтронных мониторов. Кроме того, страница содержит графики коэффициента возрастания

потока нейтронов для всех доступных станций, график времени задержки поступления данных нейтронных мониторов за последние сутки, информацию о наличии Форбуш-эффекта и о последнем детектированном событии наземного возрастания.

В таблице 1 представлен список событий наземного возрастания, зарегистрированных системой генерации алертного сигнала (GLE №73, GLE №74, GLE №75, GLE №76), которые будут рассматриваться в данной статье.

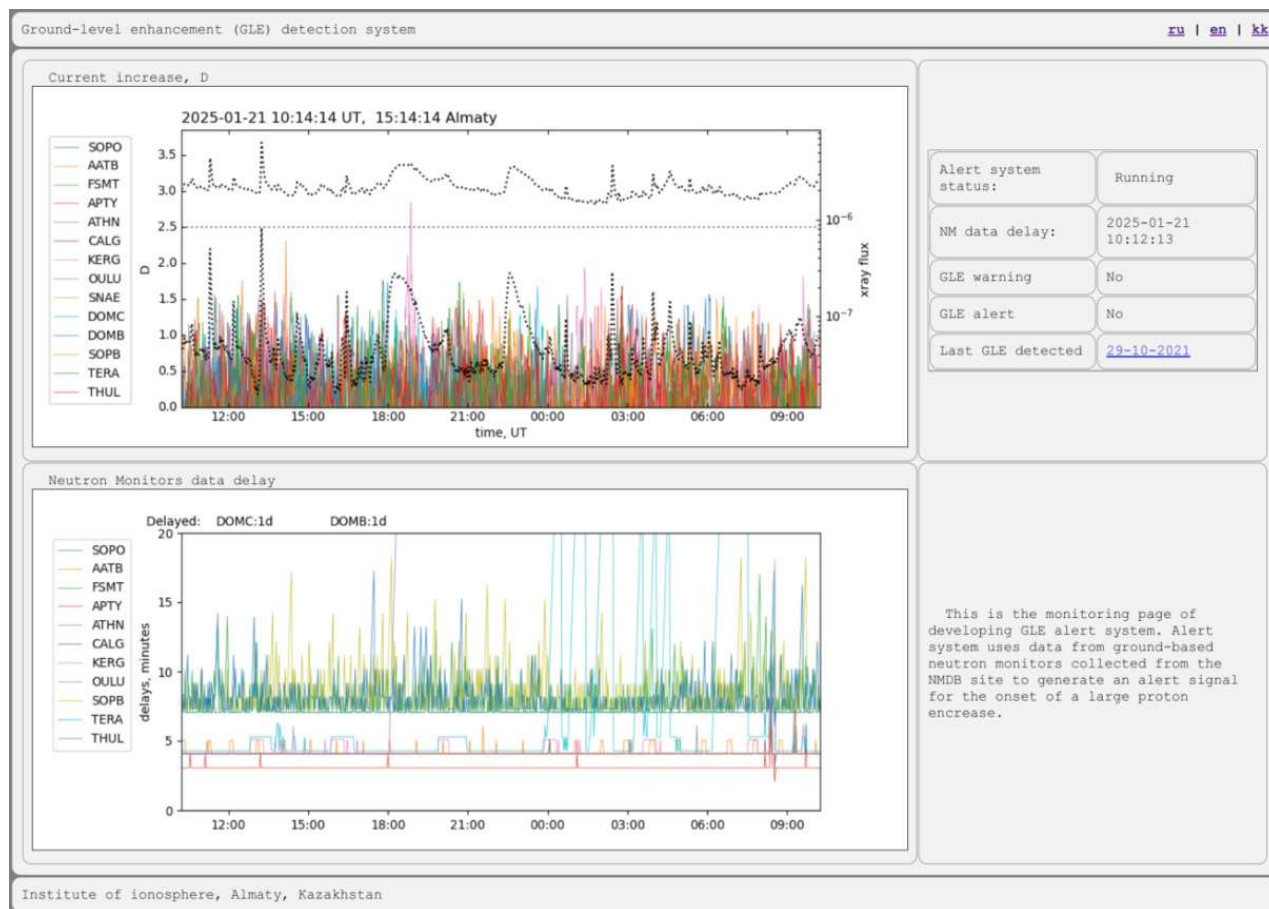


Рисунок 3 – Веб-страница системы генерации alertного сигнала о начале большого протонного возрастания

Таблица 1 – Список событий наземного возрастания, использованных для проверки работы системы генерации alertного сигнала

Дата события	Класс события	Результат детектирования
2021-10-28	GLE № 73	Обнаружено, время 16:06 UT
2024-05-11	GLE № 74	Обнаружено, время 01:18 UT
2024-06-08	GLE № 75	Обнаружено, время 02:36 UT
2024-11-21	GLE № 76	Обнаружено, время 18:33 UT

На рисунке 4 приведен пример детектированного события наземного возрастания – GLE №73, произошедшего 28 октября 2021 года. Система успешно детектировала начало большого протонного возрастания в 16:06 по всемирному времени [15]. Чёрной вертикальной линией на графике обозначено начало самого события GLE, что позволяет чётко идентифицировать момент его возникновения.

Для большей наглядности динамики потока космических лучей и радиационной обстановки в ОКП приведены данные за 12 часов до и после события GLE. Alertный сигнал сгенерирован по данным нейтронных мониторов SOPO, FSMT, SOPB. Алгоритм генерации alertного сигнала успешно детектировал начало события, сформировав соответствующее предупреждение.

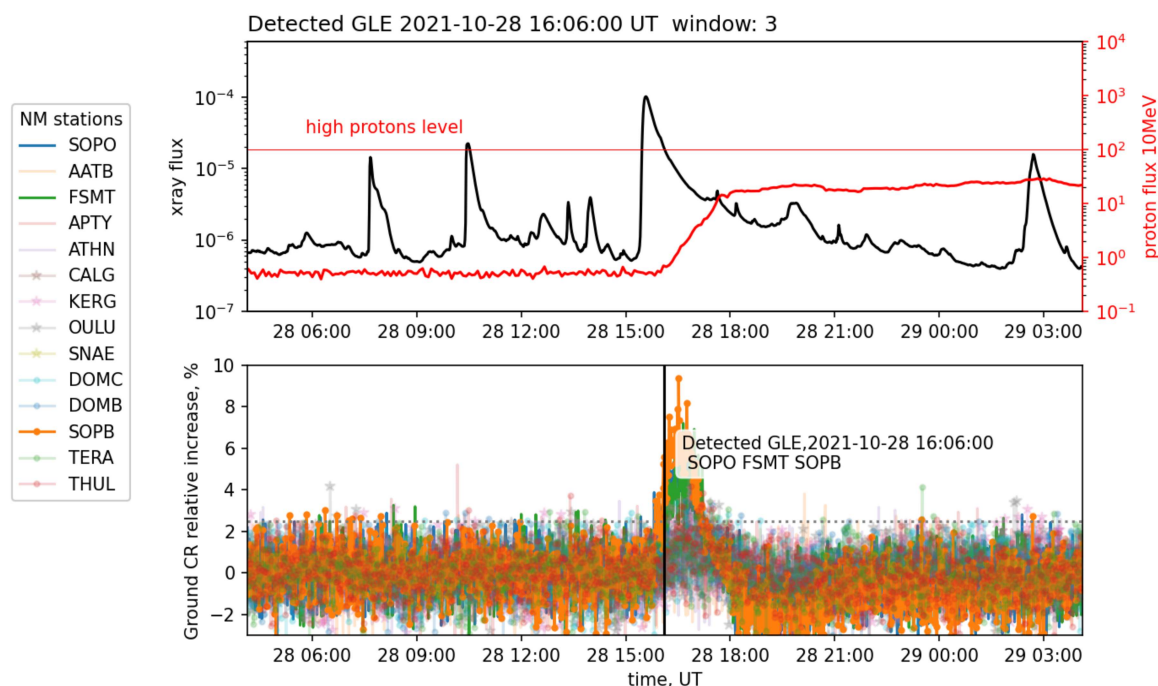


Рисунок 4 – GLE №73 (2021-10-28)

Событие GLE №74, зарегистрированное 11 мая 2024 года, было зафиксировано на 3 станциях нейтронных мониторов (AATB, FSMT, SOPB). Увеличение потока нейтронов наблюдалось значительно раньше, чем рост числа высокоэнергичных протонов, что может указывать на особенности распространения частиц в межпланетном пространстве или на влияние локальных факторов. Это требует дополнительного анализа для уточнения временной корреляции между началом события и наблюдаемыми эффектами (рисунок 5).

На рисунке 6 представлено событие GLE №75, зарегистрированное 8 июня 2024 года. Алертный сигнал был сгенерирован на основе

роста потока на станциях SOPO, DOMC и SOPB. Время начала протонного возрастания составило 02:36 UT. Данное событие является очень слабым по сравнению с другими событиями GLE.

Последнее зарегистрированное событие GLE №76, произошло 21 ноября 2024 года (рисунок 7). Момент обнаружения наземного возрастания и генерации алертного сигнала составил 18:33 UT. Максимальное увеличение потока нейтронов было зафиксировано на станциях SOPO, TERA и SOPB. Алгоритм системы оперативно сформировал алертный сигнал, что обеспечило своевременное предупреждение о данном радиационном событии.

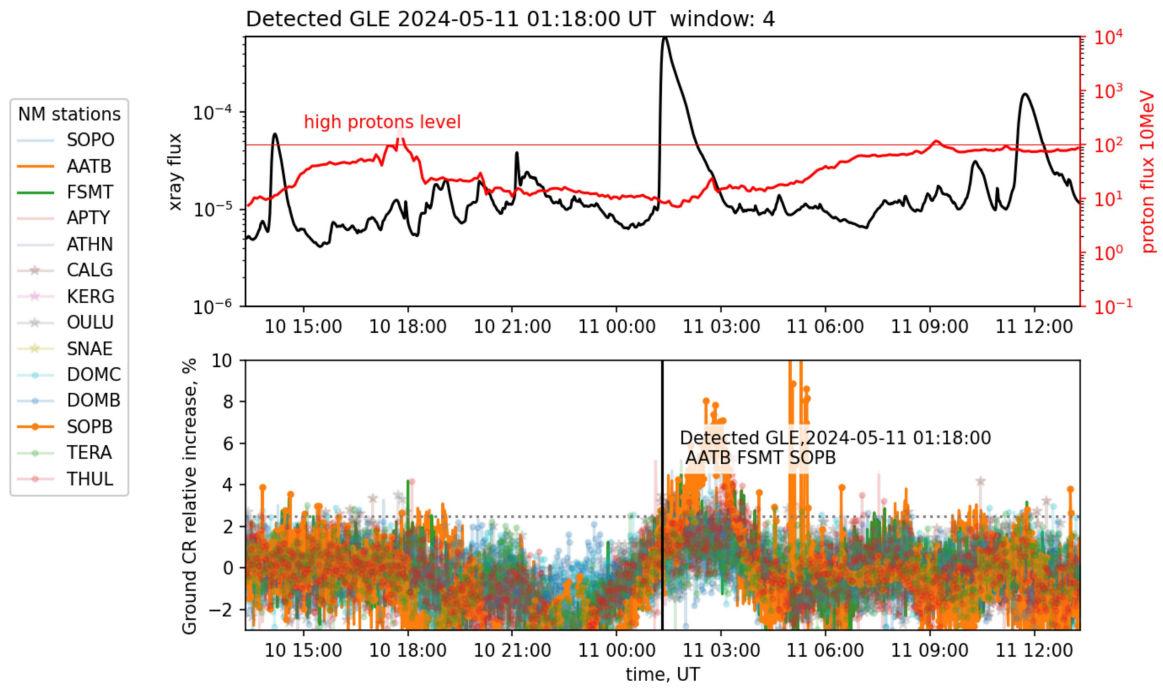


Рисунок 5 – GLE №74 (2024-05-11)

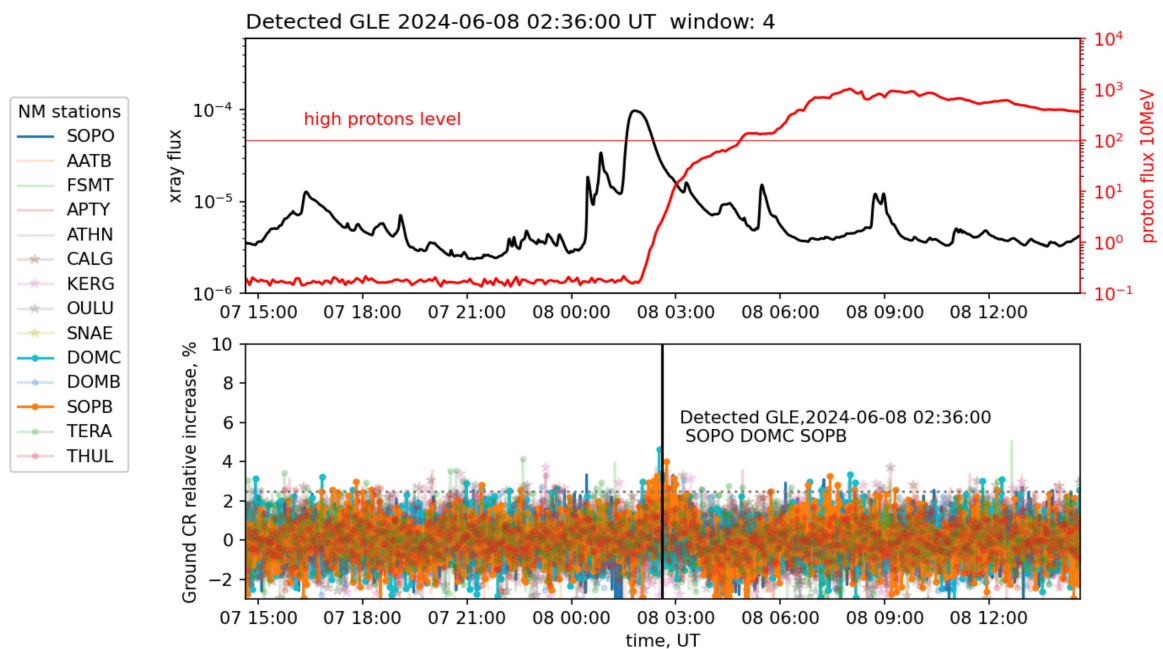


Рисунок 6 – GLE №75 (2024-06-08)

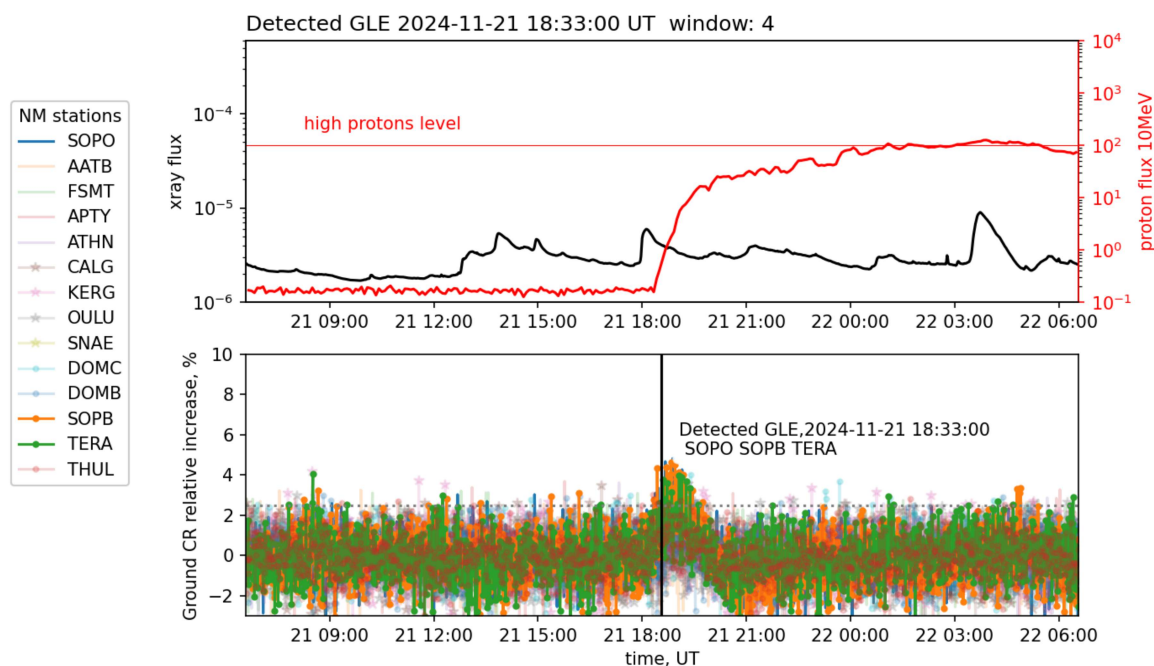


Рисунок 7 – GLE №76 (2024-11-21)

Обсуждение

Полученные результаты позволяют оценить эффективность разработанной системы и проанализировать особенности её функционирования в различных сценариях регистрации событий GLE. Была продемонстрирована способность системы детектировать все произошедшие с момента запуска системы GLE. Кроме того, система была проверена на ретроспективных данных с 2017 года, в результате чего GLE №72 так же было успешно детектировано. Это подтверждает, что разработанная система способна удовлетворять требованиям оперативного мониторинга космической погоды и предоставлять надежные данные для предотвращения радиационных угроз.

Реализация системы мониторинга создает дополнительные перспективы для повышения безопасности и обеспечения надежности орбитальных аппаратов в планировании долгосрочных проектов, учитывающих воздействие космической радиации. Таким образом, данная разработка имеет широкий потенциал для применения в научной и практической деятельно-

сти, связанной с мониторингом космической погоды и защитой космических систем.

Заключение

В статье было приведено описание разработанной Казахстанской алертной системы предупреждения о начале больших протонных возрастаний на основе детектирования событий GLE. Система основана на интеграции данных международной сети нейтронных мониторов (NMDB) и данных измерения рентгеновского излучения на спутниках серии GOES. Система обеспечивает автоматизированную обработку данных в режиме реального времени, что позволяет своевременно фиксировать увеличение потока космических частиц и рентгеновского излучения Солнца. Особенностью разработанного алгоритма является его высокая точность и надежность, что достигается за счет минимизации ложных срабатываний, связанных с наличием технических шумов в данных нейтронных мониторов и эффектов роста счета на фазе восстановления после Форбуш-эффектов.

Литература

1. Dorman L. et al. Using ground-level cosmic ray observations for automatically generating predictions of hazardous energetic particle levels // *Advances in Space Research*. – 2003. – Т. 31. – №. 4. – С. 847-852.
2. Kuwabara T. et al. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather // *Space Weather*. – 2006. – Т. 4. – №. 8.
3. Anastasiadis A. et al. Solar energetic particles in the inner heliosphere: status and open questions // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2019. – Т. 377. – №. 2148. – С. 20180100.
4. Белов А. В. и др. Наземные возрастания солнечных космических лучей в трех последних циклах солнечной активности // *Геомagnetизм и аэрономия*. – 2010. – Т. 50. – №. 1. – С. 23-36.
5. Mavromichalaki H. et al. An Assessment of the GLE Alert++ Warning System // *Atmosphere*. – 2024. – Т. 15. – №. 3. – С. 345. [<https://doi.org/10.3390/atmos15030345>].
6. Mavromichalaki H. et al. GLEs as a warning tool for radiation effects on electronics and systems: a new Alert System based on real-time Neutron Monitors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2007. – Т. 54. – №. 4. – С. 1082-1088.
7. Anashin V. et al. The ALERT signal of ground level enhancements of solar cosmic rays: physics basis, the ways of realization and development // *31st International Cosmic Ray Conference, ICRC 2009*. – 2009.
8. Wu S. S., Qin G. Model of energy spectrum parameters of ground level enhancement events in solar cycle 23 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2018. – Т. 123. – №. 1. – С. 76-92.
9. Ковалев И. И. и др. Спектры вариаций и анизотропия космических лучей в периоды Форбуш-эффектов в марте 2023 года // *Kosmičeskie issledovaniâ*. – 2024. – Т. 62. – №. 6. – С. 606-612.
10. Абунина М. А. и др. Форбуш-эффекты, созданные выбросами солнечного вещества с магнитными облаками // *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике*. – 2022. – С. 21-23.
11. Mavromichalaki H. et al. Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal // *Proc. 31st ICRC*. – 2009. – С. 4.
12. Belov A. V. et al. GLEs in the last three solar cycles // *Proc. of the 31st ICRC, Lodz*, <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0993.pdf>. – 2009.
13. Belov A. et al. Proton events and X-ray flares in the last three solar cycles // *Cosmic Research*. – 2005. – Т. 43. – С. 165-178.
14. Mavromichalaki H. et al. The updated GLE alert system by ANEMOS // *NMDB@ Athens: Proceedings of the hybrid symposium on cosmic ray studies with neutron detectors, September 26-30, 2022*. – 2023. – С. 97-103.
15. Papaioannou A. et al. The first ground-level enhancement of solar cycle 25 on 28 October 2021 // *Astronomy & Astrophysics*. – 2022. – Т. 660. – С. L5.
16. Янке В. Г. Наземные возрастания солнечных космических лучей в трёх последних циклах солнечной активности. – 2009.
17. Andriopoulou M. et al. Properties of the extreme solar particle events of the cycles 22 and 23 // *31st International Cosmic Ray Conference, ICRC 2009*. – 2009.
18. Mishev A., Usoskin I. Analysis of the ground-level enhancements on 14 July 2000 and 13 December 2006 using neutron monitor data // *Solar Physics*. – 2016. – Т. 291. – С. 1225-1239.
19. Tylka A. J., Dietrich W. F. A new and comprehensive analysis of proton spectra in ground-level enhanced (GLE) solar particle events // *31th International Cosmic Ray Conference*. – Łódź : Universal Academy Press, 2009.

References

1. Dorman L. et al. Using ground-level cosmic ray observations for automatically generating predictions of hazardous energetic particle levels // *Advances in Space Research*. – 2003. – Vol. 31. – No. 4. – P. 847-852.
2. Kuwabara T. et al. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather // *Space Weather*. – 2006. – Vol. 4. – No. 8.
3. Anastasiadis A. et al. Solar energetic particles in the inner heliosphere: status and open questions // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2019. – Vol. 377. – No. 2148. – P. 20180100.
4. Belov A. V. et al. Ground-level enhancements of solar cosmic rays in the last three solar cycles // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2010. – Vol. 50. – No. 1. – P. 23-36.
5. Mavromichalaki H. et al. An Assessment of the GLE Alert++ Warning System // *Atmosphere*. – 2024. – Vol. 15. – No. 3. – P. 345. [<https://doi.org/10.3390/atmos15030345>].
6. Mavromichalaki H. et al. GLEs as a warning tool for radiation effects on electronics and systems: a new Alert System based on real-time Neutron Monitors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2007. – Vol. 54. – No. 4. – P. 1082-1088.
7. Anashin V. et al. The ALERT signal of ground level enhancements of solar cosmic rays: physics basis, the ways of realization and development // *31st International Cosmic Ray Conference, ICRC 2009*. – 2009.
8. Wu S. S., Qin G. Model of energy spectrum parameters of ground level enhancement events in solar cycle 23 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2018. – Vol. 123. – No. 1. – P. 76-92.
9. Kovalev I. I. et al. Spectra of variations and anisotropy of cosmic rays during Forbush effects in March 2023 // *Kosmičeskie issledovaniâ*. – 2024. – Vol. 62. – No. 6. – P. 606-612.
10. Abunina M. A. et al. Forbush effects caused by solar material ejections with magnetic clouds // *International Baikal Youth Scientific School on Fundamental Physics*. – 2022. – P. 21-23.
11. Mavromichalaki H. et al. Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal // *Proc. 31st ICRC*. – 2009. – P. 4.

12. Belov A. V. et al. GLEs in the last three solar cycles //Proc. of the 31st ICRC, Lodz, <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0993.pdf>. – 2009.
13. Belov A. et al. Proton events and X-ray flares in the last three solar cycles //Cosmic Research. – 2005. – Vol. 43. – P. 165-178.
14. Mavromichalaki H. et al. The updated GLE alert system by ANEMOS //NMD@ Athens: Proceedings of the hybrid symposium on cosmic ray studies with neutron detectors, September 26-30, 2022. – 2023. – P. 97-103.
15. Papaioannou A. et al. The first ground-level enhancement of solar cycle 25 on 28 October 2021 //Astronomy & Astrophysics. – 2022. – Vol. 660. – P. L5.
16. Yanke V. G. Ground-level enhancements of solar cosmic rays in the last three solar cycles. – 2009.
17. Andriopoulou M. et al. Properties of the extreme solar particle events of the cycles 22 and 23 //31st International Cosmic Ray Conference, ICRC 2009. – 2009.
18. Mishev A., Usoskin I. Analysis of the ground-level enhancements on 14 July 2000 and 13 December 2006 using neutron monitor data //Solar Physics. – 2016. – Vol. 291. – P. 1225-1239.
19. Tylka A. J., Dietrich W. F. A new and comprehensive analysis of proton spectra in ground-level enhanced (GLE) solar particle events //31st International Cosmic Ray Conference. – Lodz: Universal Academy Press, 2009.

Сведения об авторах:

Андреев Алексей Борисович – заведующий лаборатории геомагнитных исследований, ТОО «Институт Ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru)

Щербулова Екатерина Евгеньевна – магистрант, инженер лаборатории геомагнитных исследований, ТОО «Институт Ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: chsherbulova@ionos.kz)

Information about authors:

Andreev Alexey Borisovich – Head of the Laboratory of Geomagnetic Research, LLP “Institute of the ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru)

Chsherbulova Yekaterina Evgenievna – Master’s student, Engineer of the Laboratory of Geomagnetic Research, LLP “Institute of the ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: chsherbulova@ionos.kz)

Авторлар туралы мәліметтер:

Андреев Алексей Борисович – Геомагниттік зерттеулер зертханасының меңгерушісі, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: alexey.andreyev@rambler.ru)

Щербулова Екатерина Евгеньевна – магистрант, геомагниттік зерттеулер зертханасының инженері, “Ионосфера институты” ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: chsherbulova@ionos.kz)

Поступило 25.02.2025
После доработки 27.05.25
Принято к печати 12.06.25