

## ЦЕНТР АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НИИЯФ МГУ: МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Ирина Мягкова<sup>1</sup>, Владимир Калегаев<sup>1</sup>, Юлия Шугай<sup>1</sup>, Сергей Доленко<sup>1</sup>, Михаил Панасюк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Россия

<sup>2</sup> Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Россия  
e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru

**Ключевые слова:** Космическая погода, радиация, геомагнитные бури, космические эксперименты

Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ предоставляет информацию о текущем состоянии околоземного космического пространства, а также прогнозах космической погоды. Информационные сервисы SWX на Интернет-сайте центра swx.sinp.msu.ru обеспечивают доступ к текущим данным, описывающим в реальном времени уровень солнечной активности, радиационные и геомагнитные условия, а также к результатам работы нескольких моделей: прогноза скорости солнечного ветра, Dst-индекса, потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли и т.д. Интерактивные службы позволяют извлекать и анализировать данные различных экспериментов в любой заданный момент времени. Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ обеспечивает оперативный контроль и прогнозирование радиационных условий на геостационарных орбитах и на низких полярных орбитах околоземного космического пространства с использованием данных как завершённых миссий (Вернов, серия КОРОНАС) так и продолжающихся в настоящее время космических экспериментов (Ломоносов, Метеор-М №1 и №2, Электро-Л). SWX - современная гибкая система для анализа и прогнозирования космической погоды в околоземном космическом пространстве.

## SPACE WEATHER ANALYSIS CENTRE OF SINP MSU: MONITORING AND FORECAST OF THE STATE OF NEAR-EARTH SPACE

Irina Myagkova<sup>1</sup>, Vladimir Kalegaev<sup>1</sup>, Yuliya Shugai<sup>1</sup>, Sergey Dolenko<sup>1</sup>, Mikhail Panasyuk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University (SINP MSU), Russia.

<sup>2</sup> Physical Department of Lomonosov Moscow State University, Russia  
e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru

**Keywords:** Space weather, Radiation, Geomagnetic Storm, Space experiments

Space Weather Analysis Center of Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University (SINP MSU) provides information about the current state of near-Earth's space and also about the space weather forecasts. Information services SWX on the website of the center swx.sinp.msu.ru provide access to current data describing the level of solar activity, radiation and geomagnetic storms in the real time and also to the results of several models: e.g. forecast of solar wind speed, of Dst-index and of relativistic electron flux of the outer radiation belt of the Earth. Interactive services allow one to retrieve and analyze data in anyone given time moment. The Center provides operational control and forecast of radiation conditions both at Geostationary Orbits (GEO) and at Low Earth's Orbits (LEO) of the near-Earth space using data of recent space missions (Vernov, CORONAS series) and current (Lomonosov, Meteor-M, Electro-L). SWX is a modern system for the analysis and forecasting of space weather in the near-Earth space.

### Введение

Космической погодой принято называть совокупность явлений на Солнце, в солнечном ветре, гелиосфере, магнитосфере Земли и ионосфере, которые могут повлиять на работу

бортовых и наземных технологических систем, а также на самочувствие людей. Одним из первых понятие "погоды в космосе" ввел советский геофизик, Герой Советского Союза, участник знаменитой экспедиции Папанина, академик Евгений Константинович Федоров. Впервые официальное определение понятия «космическая погода» («space weather») было дано в 1995 г при разработке национальной программы NSWP - National Space Weather Program (NSWP Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995, Washington DC, 1995, США).

К явлениям космической погоды относят: а) ионизирующее электромагнитное излучение солнечных вспышек; б) солнечные протонные события - возрастание потоков энергичных протонов солнечных космических лучей (СКЛ); в) магнитные бури и суббури; г) возрастания потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли. Данные явления могут стать причиной возрастания радиационной опасности во время космических полетов (б, г) и авиационных рейсов (б), нарушения радиосвязи (а, в), сбоев в работе космических аппаратов (б, г), телеграфных линий, трубопроводов, линий электропередач и энергосетей (в), а также возможного ухудшения самочувствия некоторых людей (в).

По существующим оценкам более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства [1-3]. Основной вклад в суммарную радиационную дозу вносят протоны СКЛ с энергией 20-500 МэВ. Необходимо учитывать, что если возрастание потоков СКЛ происходит во время магнитной бури, то проникновения частиц СКЛ в магнитосферу Земли происходит на более низкие широты вследствие изменения структуры магнитосферного магнитного поля.

Во время геомагнитных бурь поток релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) с энергиями  $>1$  МэВ резко падает на главной фазе, а на фазе восстановления примерно в 50% случаев возрастает на несколько порядков. Магнитные бури могут происходить в результате прихода к Земле как корональных выбросов массы (КВМ), так и высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ), источником которых являются низкоширотные корональные дыры (КД) на Солнце. КВМ, как правило, связаны с солнечными вспышками, и, следовательно, вносят основной вклад в вариации ВРПЗ во время максимума солнечной активности (СА). Высокоскоростные потоки СВ, источником которых являются КД, существуют на всех фазах солнечного цикла и также могут оказывать значительное влияние на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве (ОКП), особенно в минимумах СА. Для прогнозирования вариаций потоков электронов ВРПЗ также используются данные о параметрах ММП и СВ, а также предыдущее состояние самого ВРПЗ.

Существует множество центров космической погоды по всему миру. Наиболее крупные из них: Центр прогнозирования космической погоды NOAA - Space Weather Prediction Center (SWPC / NOAA - <http://www.swpc.noaa.gov>), интегрированная система анализа космической погоды - iNTEGRATED Space Weather Analysis System (iSWA - [iswa.gsfc.nasa.gov](http://iswa.gsfc.nasa.gov)), новый проект Евросоюза SPACECASE (<http://www.fp7-spacecast.eu/index.php>). Основные задачи любого центра космической погоды - это мониторинг ОКП на основе данных различных космических миссий в режиме реального времени, с использованием результатов моделирования условий в гелиосфере и магнитосфере Земли. Каждый центр обеспечивает анализ космической погоды, основанный на конкретном наборе данных и на результатах работы реализованных в данном центре операционных моделей. Данные онлайн мониторинга, как правило, содержат данные геостационарных космических аппаратов (КА), КА, находящихся в солнечном ветре, солнечных обсерваторий.

Рассмотрим подробнее возможности мониторинга и прогноза, предоставляемые Центром анализа космической погоды НИИЯФ МГУ.

### **Система оперативного мониторинга Центра космической погоды НИИЯФ МГУ**

Радиационные условия в ОКП являются одним из основных факторов космической погоды [1]. С развитием космической техники, человечество становится все более и более зависимыми от процессов в космосе, поэтому оперативный мониторинг и прогнозирование процессов, происходящих в ОКП, становится все более и более актуальным. С другой стороны, в результате роста числа космических миссий возникает проблема получения, доступа в режиме реального времени к данным космических измерений, и их хранения.

Для адекватной оценки радиационных условий следует учитывать влияние геомагнитной активности на распространение, ускорение и рассеяние заряженных частиц в магнитосфере. Также, необходимо принимать во внимание характеристики солнечной активности – число солнечных пятен, состояние солнечной короны, нейтральное излучение

солнечных вспышек, в ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма диапазонах. Прямые измерения потоков энергичных частиц, наблюдения за солнечной и геомагнитной активностью являются основными элементами системы радиационного мониторинга.

Центр анализа космической погоды, созданный в НИИЯФ МГУ (SWx), предоставляет пользователям актуальную информацию о текущем состоянии ОКП. Информационные сервисы центра, находящиеся на сайте <http://swx.sinp.msu.ru/> обеспечивают доступ к актуальным данным, характеризующим уровень солнечной активности, геомагнитного и радиационного состояния гелиосферы и магнитосферы Земли в режиме реального времени. Для анализа данных используются модели космической среды, работающие в автономном режиме. Интерактивные сервисы позволяют извлекать и анализировать данные в заданные моменты времени. В состав мониторинговой информации, используемой для анализа радиационной обстановки, входят следующие данные:

1) со спутника SDO: изображения Солнца в диапазонах 131 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 304 Å, а также магнитограммы HMI.

2) со спутника ACE: а) плотность и скорость плазмы солнечного ветра (СВ) (частиц в см<sup>3</sup> и км/с, соответственно); б) модуль вектора и значения трех компонент межпланетного магнитного поля (ММП) (нТ); в) потоки протонов в диапазоне энергий 0.795-1.9 МэВ; д) потоки электронов в диапазоне энергий 38-315 кэВ;

3) со спутника GOES: а) потоки мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 0.5-8 Å; б) дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий 4-200 МэВ; в) интегральные потоки электронов с энергиями >0.8 МэВ и >2 МэВ.

4) со спутников Электро-Л1 и Л2: а) дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий 13,5-320 МэВ; б) интегральные потоки электронов в диапазоне энергий >1.3 МэВ;

5) со спутников Метеор-М1 и М2: а) дифференциальные потоки протонов в диапазоне энергий от 1 до 260 МэВ; б) интегральные потоки электронов в диапазоне энергий от >100 кэВ до >4 МэВ; 6) Геомагнитные индексы Dst и Kp.

Поступающая в Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ информация загружается в базу данных и выполняется усреднение данных по стандартным временным интервалам: 1 мин., 5 мин., 1 час. После этого запускаются модели и приложения, позволяющие рассчитать прогнозируемые значения измеряемых параметров космической среды (скорость солнечного ветра, поток релятивистских электронов на геостационарной орбите и т.д.), а также оценить не измеряемые прямо ключевые параметры магнитосферы Земли - давление солнечного ветра и/или расстояние до подсолнечной точки. Результаты моделирования также заносятся в базу данных. Для каждого временного разрешения формируются три потока данных: данные измерений; прогнозируемые значения данных измерений, необходимые для работы приложений; прогнозируемые значения факторов космической погоды, прямо не измеряемые КА, позволяющие эффективно осуществлять автоматический онлайн анализ, выполняемый одновременно для характеристик ММП и СВ, геомагнитных индексов, потоков заряженных частиц разных энергий, измеряемые в разных областях ОКП. Такой подход позволяет проследить всю цепочку гелио- и геофизических возмущений «Солнце – гелиосфера – солнечный ветер – магнитосфера Земли», в конечном итоге влияющих на радиационное состояние ОКП, создавая условия, критичные для функционирования КА.

Оперативный анализ данных спутниковых и наземных экспериментов является важным для анализа космической погоды. Изучение взаимосвязи процессов на Солнце, в солнечном ветре и магнитосфере Земли требует разных данных для разных периодов времени. Наборы данных часто перекрываются, иногда трудно определить, какие именно данные необходимы для текущих научных исследований. Сервис, представляемый на странице <http://swx.sinp.msu.ru/current.php>, позволяет исследователю выбирать необходимые данные для анализа, просматривать их в графическом представлении, экспортировать в цифровом виде.

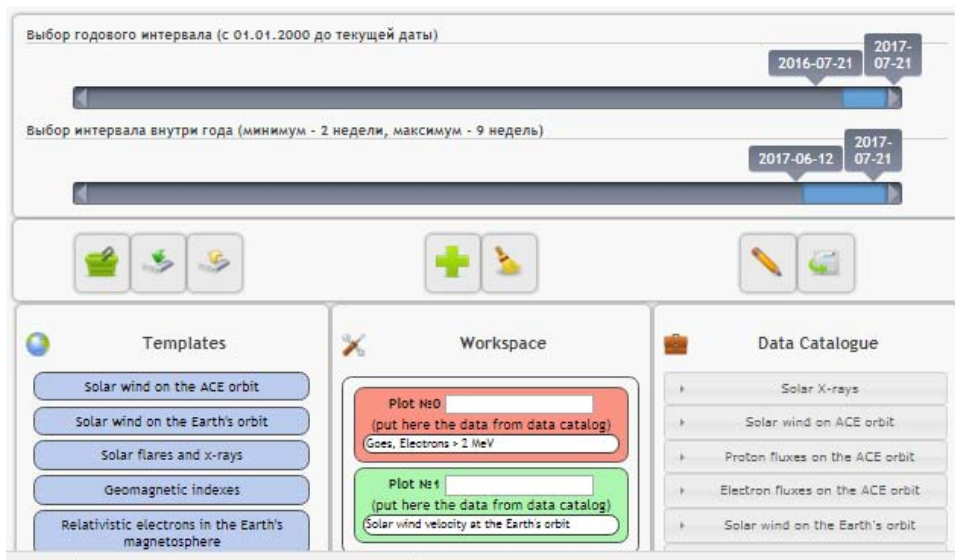


Рис. 1. Система оперативного анализа данных Центра космической погоды НИИЯФ МГУ <http://swx.sinp.msu.ru/current.php>

Сотрудниками Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ разработана оригинальная методика обработки данных о потоках энергичных заряженных частиц, измеряемых на экспериментах КА с круговыми полярными орбитами. Данная методика основана на возможности автоматического разделения данных полярных спутников в соответствии с природой регистрируемых частиц и преобладающими на выбранных участках орбиты физическими процессами - солнечные космические лучи (СКЛ), измеряемые в полярных шапках, и электроны внешнего радиационного пояса земли (ВРПЗ). Это дает возможность сравнивать данные геостационарных и полярных спутников с круговой орбитой.

На верхней панели рисунка 2 показаны вариации потоков протонов СКЛ, измеренных на КА GOES и Метеор-М №1, выделенные при помощи автоматической системы разделения. Данные рисунки получены при помощи системы оперативного анализа данных SWx <http://swx.sinp.msu.ru/current.php>.

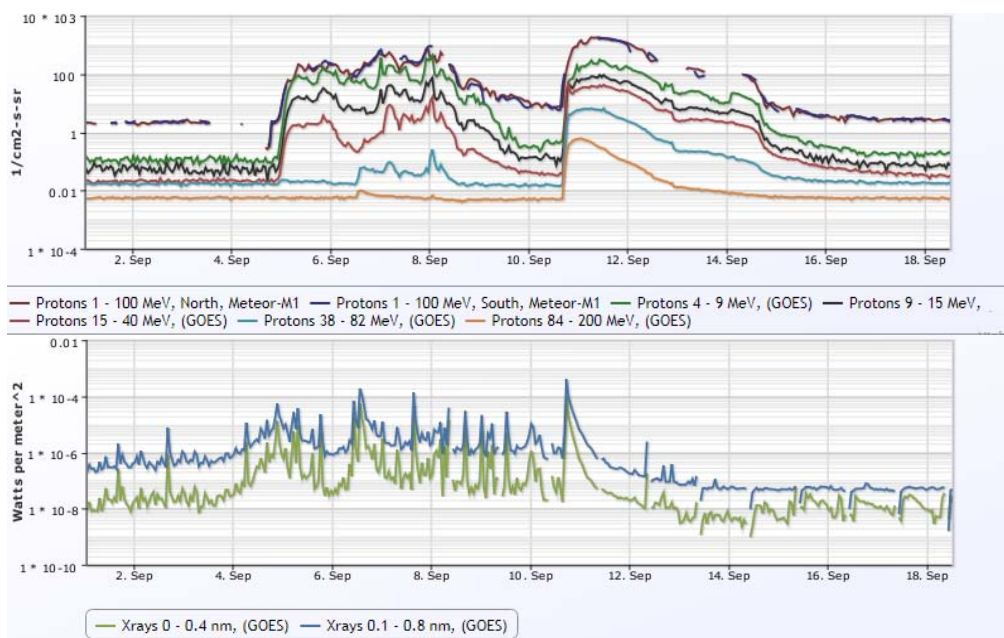


Рис. 2. Временные зависимости потоков солнечных протонов с энергиями от 1 до 200 МэВ, измеренные в первой половине сентября 2017 года в экспериментах на борту КА GOES-15 и Метеор-М №1 (верхняя панель) и мягкого рентгеновского излучения по данным GOES-15

На верхней панели рисунка 2 видно, что профиль протонов, измеренные на КА Метеор-М №1 (красная и синяя кривые) согласуется с профилем протонов, измеренных на GOES-15.

Разработанная методика разделения потоков частиц разной природы полезна также при исследовании вариаций потоков электронов СКЛ в ОКП. Это особенно актуально, поскольку в экспериментах на геостационарной орбите электроны СКЛ не регистрируются. Из рисунка 3 видно, что вариации потоков электронов СКЛ на КА ACE точке Лагранжа L1 (зелёная линия), и на КА «Метеор-М №1» на высоте 850 км в северной (черная линия) и южной (красная линия) полярных шапках имеют сходный характер.

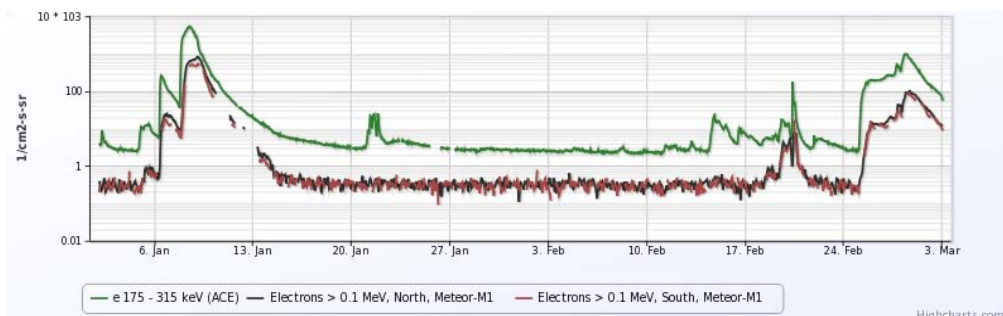


Рис. 3. Временные зависимости потоков электронов СКЛ энергиями 175-315 кэВ (ACE) и > 100 кэВ (Метеор-М №1), измеренные в январе-феврале 2014 года

### **Системы прогнозирования состояния околоземного пространства на сайте Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ**

Системой радиационного мониторинга Центра анализа данных космической погоды НИИЯФ МГУ предусмотрено прогнозирование факторов космической погоды, базирующихся на следующих инженерных моделях:

1. Прогнозирование скорости параметров солнечного ветра;
2. Прогнозирование геомагнитных индексов;
3. Прогнозирование среднечасовых потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (РЭ ВРПЗ) на геостационарной орбите;
4. Прогнозирование суточных флюенсов РЭ ВРПЗ на геостационарной орбите;
5. Прогнозирование экстремальной границы проникновения протонов СКЛ на средние широты на главной фазе электромагнитной бури;
6. Прогнозирование положения полярной границы внешнего радиационного пояса Земли;
7. Прогнозирование потоков и доз на низких орбитах.

Перечисленные модели используют данные измерений, хранящиеся в базе данных, интернет-портал <http://swx.sinp.msu.ru> обеспечивает доступ к данным моделирования, выполненным в режиме он-лайн. Например, результат прогнозирования скорости солнечного ветра по модели [4] на основе данных наблюдений за солнечной короной спутником SDO в спектральном диапазоне с центром на длине волны 19.3 нм представлены на странице [http://swx.sinp.msu.ru/models/solar\\_wind.php](http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php).

Так как известно, что основной причиной возникновения возмущений магнитосферы в целом, и внешнего РПЗ в частности, является солнечный ветер (СВ), в качестве входных данных для прогнозирования как значений Dst-индекса [5], так и величины потоков РЭ РПЗ используются параметры плазмы СВ и межпланетного магнитного поля (ММП). В настоящее время входными данными для прогноза служат передаваемые на Землю в реальном времени данные ИСЗ ACE (Advanced Composition Explorer), который находится в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землёй, на расстоянии около 1.5 млн. км от последней.

Поскольку не существует простой и очевидной связи между геомагнитными возмущениями, потоком РЭ ВРПЗ и параметрами космической среды, для прогнозирования геомагнитных индексов и потоков РЭ требуется разработка моделей, основанных на адаптивных методах и их программная реализация. В Центре космической погоды НИИЯФ МГУ

используются прогностические модели, созданные на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). В качестве входов для прогнозирования Dst-индекса используются следующие данные: 1) параметры СВ (скорость СВ и плотность протонов в СВ) и ММП ( x-, y-, z-компоненты и амплитуда напряженности ММП), которые измеряются в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем прибором SWEPAM KA ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/Browse Data>); 2) геомагнитные индексы Dst и Kp (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

В случае, если требуемые значения с необходимым шагом по времени недоступны, они вычисляются в реальном времени на основе среднечасовых значений соответствующих параметров. Пример результата нейросетевого прогноза Dst-индекса на один час вперед, осуществляемого в Центре космической погоды НИИЯФ МГУ представлены на рис. 4 (<http://swx.sinp.msu.ru/models/dst.php>).



Рис. 4. Результат ИНС-прогнозирования Dst- индекса на час вперед с 24 по 30 сентября 2017 г.

Зеленые точки - результат прогноза, красная кривая - экспериментальные данные. Из рисунка 4 видно, что прогноз Dst-индекса на час вперед можно считать удовлетворительным.

При прогнозировании потоков РЭ ВРПЗ [6] помимо величин, используемых при прогнозировании Dst в качестве входного параметра берется также сам поток электронов с энергией  $E > 2$  МэВ [ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})$ ], которые измеряются прибором SEM на геостационарных спутниках серии GOES ([https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg/](https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/)). Результат прогноза потоков электронов ВРПЗ (<http://swx.sinp.msu.ru/radiastatus/forecast.php?gcm=1>) представлен на рисунке 5. Видно, что прогноз успешно осуществляется даже при изменении потока РЭ ВРПЗ на несколько порядков.

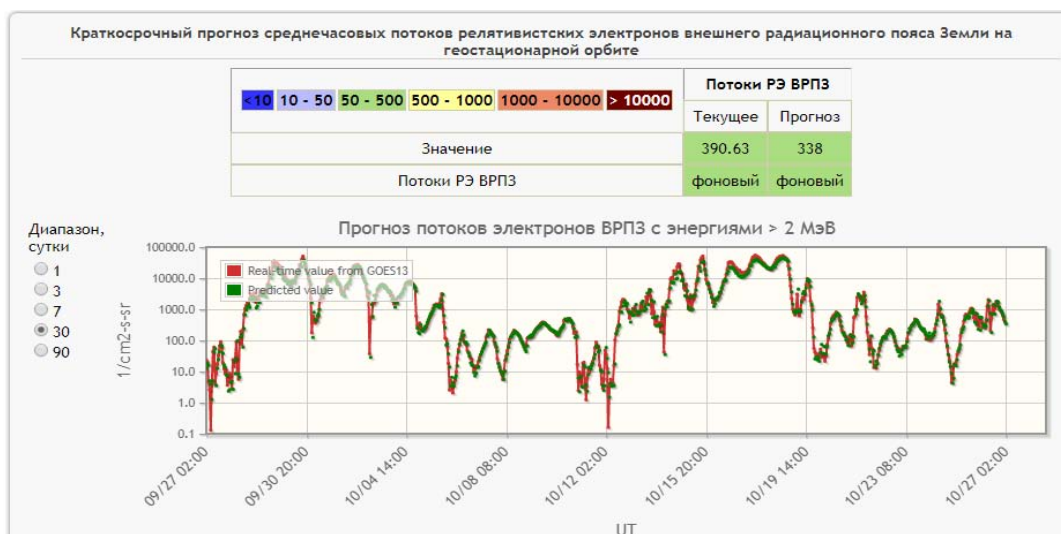


Рис. 5. Результат ИНС-прогнозирования потока РЭ ВРПЗ на час вперед с 27.09 по 27.09 2017 г.



## Закключение

Мы показали, что в НИИЯФ МГУ создана уникальная автоматизированная система анализа и прогнозирования радиационных условий в ОКП. Поступающая спутниковая информация в режиме обрабатывается онлайн в Центре анализа космической погоды и используется для текущего анализа и прогноза состояния ОКП. Система позволяет прогнозировать такие ключевые факторы космической погоды как скорость солнечного ветра, амплитуду геомагнитных возмущений (Dst-индекс), а также среднечасовые потоки и суточные флуенсы релятивистских электронов ( $E > 2$  МэВ) на геостационарной орбите. Предполагается дальнейшее развитие системы мониторинга и прогноза факторов космической погоды.

## Литература:

1. Cole, D.G. «Space weather: Its effects and predictability» // *Space Sci. Rev.* 2003. **107**, pp. 295-302.
2. Dorman, L.I. , N. Iucci, A.V. Belov., et al., «Space weather and spacecrafts anomalies» // *Annales Geophysicae*. 2005. **23**(9), pp. 3009-3018.
3. Pilipenko, V., N. Yagova N. Romanova, J. Allen «Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles» // *Adv.in Space Res.* 2006. **37**, pp. 1192–1205.
4. Slemzin, V. A., Y. S. Shugai «Identification of coronal sources of the solar wind from solar images in the EUV spectral range» // *Cosmic Research*. 2015. **53**, pp. 47–58.
5. Dolenko, S. A., I. N. Myagkova, V. R. Shiroky, and I. G. Persiantsev «Objective discrimination of geomagnetic disturbances and prediction of Dst index by artificial neural networks». In *Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos" 2014*, St. Petersburg, pp. 270–275.
6. Myagkova, I. N., S. A Dolenko, A. O. Efitov, V. R. Shirokii and Sentemova «Prediction of relativistic electron flux in the earth's outer radiation belt at geostationary orbit by adaptive methods». *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. **57**(1), pp. 8–15.