

УДК 550.38

А. С. Парновский¹, Ю. И. Ермолаев², И. Т. Жук¹

¹Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
та Национального космического агентства Украины, Київ

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, РФ

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Наводиться огляд методів прогнозування космічної погоди, аналізуються їхні переваги та недоліки і пропонуються шляхи подальшого розвитку. Зокрема, урахування великомасштабної структури сонячного вітру допоможе підвищити точність прогнозу стану магнітосфери й іоносфери Землі.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время заметно возрос интерес к изучению космической погоды. Этот интерес закономерен, так как наука получает все новые свидетельства того, что Солнце и ближайшее космическое пространство оказывают существенное влияние как на технику (космического и наземного базирования), так и на биосферу, включая организм человека. При этом зачастую под термином «космическая погода» понимаются абсолютно разные физические явления и процессы. Наиболее общим является понятие «солнечно-земные связи», которое включает в себя все прямые и опосредованные связи между солнечными и земными процессами. Под термином «космическая погода» обычно понимают процессы с характерным временным масштабом порядка 1 сут и менее, т. е. наиболее динамичная часть солнечно-земных связей. Медленные процессы (так называемый «космический климат») обычно выбрасываются из рассмотрения или учитываются как некоторый медленный тренд, не оказывающий существенного влияния на быстрые процессы. Проявления космической погоды достаточно многообразны и неоднократно описывались [3, 5, 6, 9, 47] и в ссылках в них. В настоящей работе мы ограничимся коротким описанием истории становления космической

погоды как раздела науки и анализом современных методов прогнозирования эффектов космической погоды.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ НАУКИ

История изучения солнечно-земной физики, в т. ч. космической погоды, насчитывает уже много веков. Уже у Ксенофана (VI век до н. э.) находим упоминания о «подвижных скоплениях пылающих облаков», которые, несомненно, являются описанием полярных сияний. Аналогичные места можно найти в Ветхом Завете, в китайской литературе (некоторые из них датируются раньше 2000 г. до н. э.). Однако только в XVII в. появились первые теории полярных сияний. Например, Галилей считал, что полярные сияния связаны с отражением солнечного света поднимающимся из тени Земли воздухом. Именно он ввел термин *aurora borealis*, который используется до сих пор. Приблизительно в то же время Гассенди (Gassendi) пришел к выводу, что полярные сияния происходят на большой высоте, т. к. они выглядят очень похоже из очень отдаленных друг от друга мест. Его современник Декарт выдвинул гипотезу о том, что полярные сияния вызваны отражением света от кристаллов льда на больших высотах. Первым, кто связал авроральные явления с магнитным полем Земли, был Галлей, а в 1731 г. де Мери высмеял гипотезу Декарта, но в то же время критиковал и гипотезу Галлея; по его мнению, авроральные

явления были связаны с атмосферой Солнца. Он также заметил связь между количеством пятен на Солнце и интенсивностью полярных сияний. Это было подтверждено в 1741 г. Гертером, который показал, что геомагнитная и авроральная активности коррелируют. С того времени изучение геомагнетизма и авроральных явлений стали проводиться одновременно. В 1770 г. Кук впервые сообщил о южном аналоге полярных сияний — *auroga australis*. Через 20 лет Кавендиш оценил высоту полярных сияний между 83 и 114 км.

История измерений геомагнитного поля не такая долгая. Первые упоминания о компасе можно найти в китайской литературе XI в. н. э. Сонь-Кау писал, что «провидцы натирают конец иголки магнитным камнем, чтобы она указывала на юг». В европейской литературе первые упоминания о компасе встречаются в работах Никама «*De Untensilibus*» и «*De Regum*» (ок. 1200 г.). Ни в одной из них он не описывал компас как новинку; в то время он был уже довольно распространенным. По официальным данным к XIV в. многие корабли имели компасы. Неизвестно, когда впервые было измерено магнитное склонение, но в 1544 г. викарий собора св. Себальда в Нюрнберге Хартманн писал герцогу Альбрехту Прусскому о том, что по его измерениям магнитное склонение в Риме в 1510 г. составляло 6° на восток, в то время как в Нюрнберге оно составляло 10°. Также известно, что между 1538 и 1541 гг. де Кастро произвел 43 измерения склонения возле западного побережья Индии и в Красном море. В письме Хартманна также шла речь об измерении магнитного наклона, но его данные оказались ошибочными. Гильберт описал открытие магнитного наклона англичанину Норману, который в 1576 г. опубликовал работу «*The newe Attractiue containyng a short discourse of the Magnes or Lodestone, and amongest other his vertues, of a newe discovered secret and subtill propertie, concerning the Declinyng of the Needle, touched there with onder the plaine of the Horizon. Now first found out by ROBERT NORMAN Hydrographer. Here onto are annexed certaine necessarie rules for the art of Nauigation, by the same R. N. Imprinted at London by John Kyngston, for Richard Ballard, 1581*».

Большим прогрессом стало создание в начале XIX в. сети магнитометров, позволяющих вести одновременные измерения магнитного поля в разнесенных в пространстве точках. Лидерами этого проекта были фон Гумбольдт и Гаусс, также разработавший методы математического анализа результатов измерений, что позволило отделить магнитное поле под поверхностью Земли от поля в верхних слоях атмосферы. В то же время Швабе (Schwabe), опираясь на свои измерения количества солнечных пятен, проведенные с 1825 по 1850 гг., обнаружил, что количество пятен изменялось периодически с периодом около 10 лет. В 1851 г. Сабин показал, что интенсивность геомагнитных возмущений изменяется в соответствии с солнечным циклом.

В 1861 г. Стюарт открыл геомагнитные пульсации, а в 1882 г. предположил существование ионосферы. Около 1878 г. Беккерель высказал предположение о том, что частицы с Солнца попадают в авроральную зону при помощи геомагнитного поля. По его мнению, из солнечных пятен эжектировались протоны. Аналогичная теория была выдвинута Голдштейном (Goldstein). В 1897 г. Биркеланд провел свою первую авроральную экспедицию в северную Норвегию, правда только в третьей экспедиции 1902—1903 гг. он получил достаточное количество данных о магнитных возмущениях, связанных с полярными сияниями, из которых он сделал вывод, что во время сияний вдоль силовых линий магнитного поля протекают большие токи. С открытием электронных трубок стало ясно, что полярные сияния в определенной мере похожи на катодное излучение, состоящее из электронов. Вооружившись этими идеями, Биркеланд изготовил лабораторную модель Земли, которую он назвал «терелла». Эксперименты с ней показали, что попадающие в нее электроны вызывают явления, очень похожие на полярные сияния. Биркеланд предположил, что источником этих частиц является Солнце. Теоретическая основа для этих экспериментов была вскоре разработана Штормером (Størmer), предсказавшим открытие радиационных поясов и области захваченной радиации. В 1918 г. Чепмен и Линдемэнн предложили модель, в которой поток частиц от

Солнца состоял из положительно и отрицательно заряженных частиц в равных количествах, чтобы поток не распался; теперь это называется плазмой. В серии работ [26—29] с 1930 г. Чепмен и Ферраро разработали модель взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, отличающуюся от принятой теперь тем, что в ней силовые линии магнитного поля в хвосте замкнуты, а солнечный ветер существовал только во время активности. В 1943 г. Хоффмайстер (Hoffmeister) заметил, что хвосты комет вытянуты не вдоль траектории, а отклоняются приблизительно на 5° от Солнца. В 1951 г. Бирманн объяснил это отклонение взаимодействием с солнечным ветром. Он установил, что скорость солнечного ветра составляет около 450 км/с, что совпадает с современными представлениями, а электронная плотность — около 600 см^{-3} , что на два порядка превышает современные представления. В 1957 г. Альвен постулировал, что солнечный ветер является замагниченным, в 1958 г. Паркер разработал теорию движения замагниченной плазмы, а в 1962 г. он же оценил [61], что электронная плотность солнечного ветра не превышает 30 см^{-3} . Подтверждения не пришлось долго ждать — уже началась космическая эра, и советские и американские спутники передали данные, четко подтверждающие наличие солнечного ветра с вмороженным магнитным полем, измерили его свойства, и продемонстрировали его определяющую роль в геомагнитных и авроральных процессах.

В 1910 г. директор обсерватории Колаба (теперь Индийский институт геомагнетизма) Мус начал использовать вариации H -компонента геомагнитного поля в качестве характеристики геомагнитной активности [52]. В последующем на основе этих вариаций был разработан D_{st} -индекс (шторм-тайм вариация). Впоследствии были разработаны и другие индексы, из которых наиболее широко используемыми являются K , K_p , A , A_p , AE , AU , AL , ED_{st} и D_{st}^* .

В 1902 г. Кеннелли и Хевисайд независимо предположили существование высокопроводящей ионосферы, чтобы объяснить трансатлантическую радиосвязь Маркони. Эти идеи были подтверждены в 1925 р., когда Эпплтон и Бар-

нетт в Великобритании, и вскоре Брейт и Туве в США, определили ее наличие и высоту. Эпплтон также ввел обозначения D, E и F для ионосферных слоев.

В то время, когда ионосфера была открыта по своему влиянию на искусственные радиосигналы, также исследовались природные радиоизлучения, и к ним применялась магнитоионная теория, разработанная для искусственных радиосигналов. Впервые эти сигналы в акустическом диапазоне, названные впоследствии «вистлерами», «свистящими атмосфериками» или просто «свистами», были замечены на 22-км телефонной линии в Австрии в 1886 г. В 1894 г. британские телефонные операторы слышали писки, которые были, скорее всего, вистлерами, генерируемыми молниями, и «утренние хоры», которые генерируются глубоко в магнитосфере во время полярных сияний. Во время первой мировой войны связисты неоднократно слышали свистящие шумы. Причина этих явлений была окончательно установлена только в 1950-е гг., когда Стори при помощи самодельного спектрометра провел подробный анализ вистлеров. Он выяснил, что они вызваны вспышками молний, электромагнитная энергия которых отражается от ионосферы и поверхности Земли, образуя нечто вроде резонатора.

Эксперименты на ракетах дали возможность начать исследования магнитосферы. В 1950-е гг. ван Аллен произвел ряд запусков в Арктике и Антарктике до высоты 110 км. Эти зонды зарегистрировали либо высокоэнергичные электроны, либо их тормозное излучение. В 1957 г. был официально объявлен международный геофизический год, 18-месячный период всемирных геофизических исследований. В том же году был запущен первый искусственный спутник Земли. В 1958 г. при помощи счетчика Гейгера—Мюллера, установленного на КА «Эксплорер 1», ван Аллен обнаружил радиационные пояса, одновременно аналогичные исследования были выполнены советскими учеными С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым. В 1958 г. была проведена операция «Аргус»: три высотных ядерных взрыва в Южной Атлантике, в результате которых был образован новый радиационный пояс, просущест-

вовавший несколько недель. Приборы на советских зондах «Луна» обеспечили первые измерения солнечного ветра, а приборы на КА «Маринер 2» в 1962 г. более подробно измерили его плазменные параметры. КА «Эксплорер 10», запущенный в 1961 г., впервые измерил параметры магнитопаузы, но детальные ее исследования были проведены только КА «Эксплорер 12». По результатам измерений первых КА выяснилось, что солнечный ветер проходит сквозь фронт головной ударной волны, что удивило тогдашних исследователей, поскольку плазма солнечного ветра — бесстолкновительная. Впоследствии, после запусков КА OGO 1, OGO 3 и OGO 5, первый из которых был запущен в 1964 г., выяснилось, что колебания электрических и магнитных полей в плазме создают эффекты, аналогичные столкновениям, что приводит к диссипации энергии солнечного ветра, и замедляет его до дозвуковых скоростей, что обеспечивает обтекание планет [71]. В целом на протяжении 60-х гг. космические аппараты OGO, IMP и «Вела», установили, что параметры ударной волны очень чувствительны к параметрам плазмы и направлению межпланетного магнитного поля, а также измерили число Маха и плазменный параметр в этих волнах. Эти волны важны, так как они определяют характеристики солнечного ветра до столкновения с магнитопаузой, но последняя более важна, поскольку определяет количество энергии, попадающей в магнитосферу. Арнольди и Хиршберг на основании данных КА «Эксплорер 33» и «Эксплорер 35» открыли перезамыкание силовых линий, механизм которого был предложен Данжи в 1961 г. КА OGO 5, запущенный в 1968 г., показал эрозию дневной магнитосферы и соответствующую активность в хвосте. Этот процесс, также приводящий к авроральным явлениям, называется суббурей. Более подробно о физике явлений, связанных с космической погодой, можно ознакомиться в книгах [1, 5, 6, 44].

Большую роль в понимании солнечно-земных связей имело наблюдение вспышек 28 августа и 1 сентября 1859 г. Последняя была настолько сильной, что ее было видно невооруженным глазом [22, 39]. Во время вспышки были искажены параметры магнитного поля, а через 18 часов

началась самая сильная геомагнитная буря в истории человечества. Полярные сияния наблюдались даже в Пуэрто-Рико, а газета New York Times сообщала, что в Бостоне полярное сияние было настолько сильным, что около часа ночи можно было читать при его свете. Стюарт в работе [75] описал оба авроральных события по данным самопишущего магнитометра на обсерватории Kew и связал магнитную бурю 2 сентября 1859 г. с исключительно яркой вспышкой Каррингтона-Ходгсона [22, 39]. Считается, что эта буря была вызвана самым мощным корональным выбросом массы в истории, практически на пределе того, что способно породить Солнце. Благодаря этому событию авроральные явления стали прочно связываться с электрическими полями. Этот результат был получен не только благодаря магнетометрическим измерениям, но и в результате выхода из строя на несколько часов более 200 тыс. км телеграфных линий [70]. Тем не менее, некоторые линии подходящей длины и ориентации продолжали работать благодаря наводимому в них индукционному току. Наиболее известным примером такой линии является линия Бостон—Портланд, в которой в течение двух часов телеграфные сообщения передавались при отключенном электропитании.

Что произойдет, если повторится геомагнитная буря того же масштаба, что в 1859 году? Ведь электромагнитная обстановка при столь сильном возмущении будет сродни той, что возникает вследствие электромагнитного импульса ядерного взрыва. Как показывают результаты моделирования [11], в таких условиях полупроводниковая элементная база может перманентно выйти из строя, а сегодняшняя цивилизация в значительной степени зависит от работы электронных устройств. В недавнем отчете Национальной академии наук США [73] отмечалось, что подобное событие приведет к длительному выходу из строя трансформаторных подстанций высокого напряжения, следствием чего станут масштабные отключения электроснабжения наиболее промышленно развитых стран. Кроме того, как было экспериментально показано в ходе серии высотных ядерных испытаний «Hardtask», проведенных США в 1958 г., изменение элект-

ронной концентрации ионосферы создаст серьезные помехи для связи. Учитывая, что в таких условиях спутники связи вряд ли сохранят работоспособность, как это случилось со спутником «Телстар 401», потерянным в результате геомагнитной бури 7 января 1997 г., это может привести к полному прекращению связи между западным и восточным полушариями. Подробнее этот вопрос обсуждается в работе [56].

К счастью, такие сильные бури происходят исключительно редко. Но даже существенно более слабая геомагнитная буря 13 марта 1989 г. привела к полному коллапсу энергосистемы Канады, в результате чего 6 миллионов человек были лишены электричества в течение 9 ч. А кроме работы технических систем, геомагнитные бури влияют также и на состояние здоровья людей, причем относится это не только к астронавтам и экипажам самолетов, а ко всем жителям Земли, и в первую очередь к людям, имеющим сердечно-сосудистые патологии [2, 60, 76]. Первым эту связь установил А. Л. Чижевский в середине 1920-х годов [13—16]. О рисках, связанных с магнитными бурями, можно узнать из работы [37].

Предположительно термин «космическая погода» в научной литературе впервые использован А. Л. Чижевским. Тем не менее, до сих пор нет единого мнения о его значении. Официальное определение, принятое COSPAR, звучит следующим образом: «Космическая погода описывает физические процессы, вызванные солнечной активностью, имеющие влияние на земную и космическую среды, на наземные и космические технологические системы, а так же на здоровье и деятельность людей». Это определение содержит в себе некоторую неоднозначность, так как космическая погода в космосе и на Земле характеризуется разным набором параметров. Кроме того, идет дискуссия и о воздействии космической погоды. Если влияние на технологические системы является общепризнанным [51, 68], то влияние на человека ставится под сомнение многими исследователями ввиду малочисленности и противоречивости экспериментальных данных. Тем не менее, такие исследования продолжают, и результаты последних лет [17, 76] свидетельствуют в пользу такого влияния. В отноше-

нии же влияния космической погоды на земную среду следует упомянуть о связи атмосферной и космической погоды, которая может приводить, в том числе, к изменению урожайности основных культур и цен на продовольствие [66]. Тем не менее, используемый в этой работе механизм влияния на облачность через модуляцию потока космических лучей был подвергнут критике в работе [34]. Это свидетельствует о том, что эксперименты доказывают наличие многих солнечно-земных связей, в то время как механизмы этих связей не до конца изучены и поняты.

Таким образом, раздел знаний, называемый космической погодой, прошел длинный и сложный путь. В настоящее время его результаты применяются во многих видах человеческой деятельности, а в некоторых случаях, таких как работа космонавтов на орбите или проведение медицинских процедур с пациентами, они просто жизненно необходимы. Поэтому возрастает значение методов прогнозирования элементов космической погоды, и этому вопросу будет посвящен следующий раздел нашей статьи.

ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Задача прогнозирования космической погоды двойка. С одной стороны, она имеет большое практическое значение, связанное с возможностью предсказания и смягчения ее негативных проявлений. Основным целевым параметром при прогнозировании в этом случае является заблаговременность прогноза. В идеале эта задача может быть решена путем запуска большого количества КА, отслеживающих пространство между Солнцем и Землей с целью обнаружения наличия крупномасштабных возмущений вроде КВМ (коронального выброса массы – СМЕ). Примерами таких КА являются уже запущенные КА STEREO и проекты КА «Solar Orbiter» и «Polar-Ecliptic Patrol», запуск которых запланирован на 2015–2020 гг. Тем не менее, не следует забывать и о хорошо зарекомендовавших себя КА ACE, SOHO и «Винд», тем более что с помощью их данных можно отработать алгоритмы прогнозирования космической погоды для дальнейшего использования. С другой сторо-

ны, эта задача имеет важное фундаментальное значение, так как позволяет описывать взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. Естественно, получение новых знаний о физических механизмах космической погоды позволяет существенно улучшить характеристики прогноза. К тому же современные представления об этих механизмах основаны на моделях, построенных еще в 1960-е гг. Эти модели не способны объяснить некоторые важные явления солнечно-земной физики.

Прогнозирование космической погоды — сложная и нетривиальная задача [47]. Достаточно очевидно, что адекватное моделирование всех процессов, приводящих к развитию геомагнитных возмущений, чрезвычайно затруднительно. Основная проблема состоит в том, что комплекс «Солнце — солнечный ветер — магнитосфера Земли» представляет собой сложнейшую нелинейную динамическую систему, в которой протекают и взаимодействуют процессы с разными пространственными и временными масштабами, и которая практически постоянно находится в неравновесном состоянии. Кроме того, полная информация о ее состоянии недоступна. Поэтому для моделирования развития геомагнитных возмущений применяются альтернативные подходы.

На сегодняшний день есть большое количество подходов и методов прогнозирования космической погоды. Приведем описание основных из них, следуя классификации [42].

1. Морфологический анализ изображений Солнца (синоптический прогноз). Этот метод основан на анализе синоптических карт и других изображений Солнца с целью предсказания высокоэнергетических событий на Солнце. На сегодняшний день он является довольно субъективным и не может быть автоматизирован. По этой же причине его точность также не поддается оценке. Вместе с тем он обеспечивает самую большую заблаговременность прогноза (до недели). Естественным развитием данного метода является каузальный прогноз, но последний лишь недавно начал разрабатываться и еще не готов к практическому применению.

2. Детектирование крупномасштабных возмущений в солнечном ветре. Пожалуй, самый

перспективный, но и самый затратный из всех методов. Предполагает постоянный мониторинг участка Солнце—Земля с использованием эклиптических и внеэклиптических КА, а также наземных средств наблюдения. Основными вариантами данного метода являются метод мерцающих радиоисточников, основанный на изменении сигналов пульсаров при прохождении сквозь возмущенную область солнечного ветра, метод радиовсплесков, основанный на обнаружении радиовсплесков II типа, связанных с КВМ, метод коронографии, основанный на обнаружении рассеянного возмущенной областью солнечного света и т. д. Кроме того, есть еще одна важная разновидность этого метода — идентификация типа потока солнечного ветра по характерному ходу его параметров [4, 35]. Все эти методы обеспечивают хорошую заблаговременность (до 2–3 сут), но предсказывают лишь часть сильных бурь с высокой долей ложных предсказаний (false alarm) и практически не предсказывают бури средней интенсивности.

3. Построение эмпирических моделей. Исторически первый метод прогнозирования космической погоды был разработан Бартоном, МакФерроном и Расселом в 1975 г. [21], и с тех пор практически не претерпел изменений. Метод основан на решении уравнения баланса энергии кольцевого тока с большим количеством подгоночных параметров. Метод обеспечивает наименьшую заблаговременность (1 ч), а его точность варьирует в широких пределах в зависимости от конкретной реализации [19, 24, 25, 53, 54, 72, 78, 79] и выборки. Потенциально этот метод мог бы дать лучшие результаты, если бы физика магнитных бурь была лучше изучена.

4. Численное моделирование. Этот метод обычно применяется, когда уже известно о наличии крупномасштабного возмущения. Он состоит из двух частей: определение времени прихода возмущения и собственно моделирование его взаимодействия с магнитосферой Земли. Если с первой частью эти методы справляются отлично, обеспечивая заблаговременность около суток при точности до 70 % [50], то со второй возникают серьезные трудности. Связаны эти трудности в первую очередь с тем, что кольцевой ток

невозможно описать в рамках идеальной МГД, которая лежит в основе большинства подобных моделей. Примерами таких моделей являются работы [33, 67].

5. Анализ временных рядов. Довольно широкая группа методов, объединенная одним общим признаком: они рассматривают магнитосферу как «черный ящик» и анализируют входные и выходные параметры. Они меньше других учитывают реальную физику, и поэтому на данном этапе обеспечивают наилучшие результаты: заблаговременность до 9 ч и точность на уровне 80—90 %. Их слабой стороной является зависимость от наличия спутниковых данных, доступных, например, в каталогах [58, 84]. При этом побочным продуктом работы этих методов является построение феноменологических моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Конкретные воплощения этого метода чрезвычайно разнообразны. Они используют методы статистики, обработки сигналов, информатики, теории управления и т. п. Рассмотрим наиболее распространенные реализации.

Искусственные нейронные сети [45, 59, 81, 83] обеспечивают заблаговременность до 4 ч, но испытывают сложности при предсказании сильных магнитных бурь с $K_p > 5$.

Методы теории оптимизации [10, 12, 18, 30, 38, 82] позволяют достичь заблаговременности 8—9 ч, однако в работах, использующих эти методы, обычно используются выборки малого объема, что негативно сказывается на репрезентативности полученных результатов.

Корреляционный анализ [57, 68] используется в основном как вспомогательное средство при разработке эмпирических моделей.

Регрессионный анализ [8, 9, 62—64, 74] позволяет достичь наилучших результатов в построении феноменологических моделей и обеспечивает заблаговременность до 6 ч при точности более 90 %. В частности, с помощью относящегося к этой группе метода регрессионного моделирования удалось установить геоэффективность двух новых параметров — углов между линией Солнце — Земля и направлением скорости солнечного ветра — и подтвердить наличие временных вариаций, описанных в работах [31, 48, 55, 77].

Важным является тот факт, что все перечисленные методы, кроме корреляционного анализа, приводят к построению регрессионной зависимости геомагнитных индексов от параметров солнечного ветра.

ВЫВОДЫ

Мы привели краткую историю становления космической погоды как специального раздела науки и проанализировали методы предсказания ее эффектов, в частности предсказания магнитосферных возмущений.

По-видимому, недостатки большинства из приведенных подходов обусловлена не ошибочным выбором метода (кроме разве что глобального МГД-моделирования), а неточной постановкой задачи, вызванной пренебрежением простыми, но крайне важными результатами наблюдений. Дело в том, что есть крупномасштабные (с характерным временем около суток) типы солнечного ветра, в которых регистрируются различающиеся между собой наборы параметров солнечного ветра [4], а с другой стороны наблюдаются магнитные бури, возбужденные различными типами солнечного ветра, которые различаются по своей реализации в магнитосфере [20, 65]. Аналогичные результаты получены и для генерации авроральных суббурь [32]. Это означает, прежде всего, что есть разные физические механизмы генерации магнитосферных возмущений в зависимости от типа межпланетных драйверов, и это необходимо учитывать при прогнозировании отклика магнитосферы на межпланетные возмущения.

Решением этой проблемы может стать использование многоступенчатого алгоритма прогнозирования космической погоды: сначала использовать методы среднесрочного прогнозирования для определения типа солнечного ветра, а затем для точного краткосрочного прогнозирования использовать специализированные модели для каждого конкретного типа события. Альтернативный подход заключается в поиске предвестников геомагнитных бурь. По утверждению О. В. Хабаровой [43] такие предвестники могут быть найдены за 1—2 сут до начала бури, и такие исследования необходимо продолжать.

1. *Акасофу С.-И., Ченмен С.* Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1975.
2. *Гурфинкель Ю. И.* Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность. — М.: Изд-во «Эльф-3». ВИНИТИ, 2004.
3. *Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофиз. процессы и биосфера. — 2009. — **8** (1). — С. 5—35.
4. *Ермолаев Ю. И. и др.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. — 2007. — **45** (1). — С. 3—11.
5. Зеленый Л. М., Веселовский И. С. (ред.) Плазменная гелиогеофизика. — М.: Физматлит, 2008.
6. *Кременецкий І. А., Черемних О. К.* Космічна погода: механізми і прояви. — Київ: Наук. думка, 2009.
7. *Парновский А. С.* Прогнозирование D_{st} -индекса методом линейного регрессионного анализа // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 48—54.
8. *Парновский А. С.* Метод регрессионного моделирования и его применение к задаче прогнозирования космической погоды // Проблемы управления и информатики. — 2009. № 3. — С. 128—135.
9. *Парновський О. С.* Генерація, стійкість та спектр власних поперечно-дрібномасштабних МГД збурень у внутрішній магнітосфері Землі: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 2006. — Машинопис.
10. *Семенов О. В. и др.* Оптимизационный подход к прогнозированию космической погоды // Проблемы управления и информатики. — 2008. — № 4. — С. 115—130.
11. *Фигуровский Д.* Электромагнитный импульс ядерного взрыва и защита от него радиоэлектронных средств // Зарубеж. воен. обозрение. — 1989. — № 8. — С. 35—41.
12. *Черемных О. К., Сидоренко В. И., Яценко В. А.* Нелинейные динамико-информационные модели магнитосферы для прогнозирования космической погоды // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 77—84.
13. *Чижевский А. Л.* Физические факторы исторического процесса. — Калуга. 1924.
14. *Чижевский А. Л.* О влиянии космических причин на деятельность аппаратов связи // Жизнь и техника связи. — 1925. — **12**. — С. 22—31.
15. *Чижевский А. Л.* Модификация нервной возбудимости под влиянием пертурбаций во внешней физико-химической среде. Опыт изучения коллективной психоневрологии // Русско-нем. мед. журнал. — 1928. — № 9. — С. 501—518.
16. *Чижевский А. Л.* О периодичности европейского Typhus recurrens // Русско-нем. мед. журнал. — 1928. — № 12. — С. 685—695.
17. *Babayev E. S.* Space weather and human health at the Earth's surface: results of Azerbaijani studies // Geophys. Res. Abstracts. — 2007. — **9**. — 00798.
18. *Balikhin M. A., et al.* Terrestrial magnetosphere as a nonlinear resonator // Geophys. Res. Lett. — 2001. — **28**, N 6. — P. 1123—1126.
19. *Ballatore P., Gonzalez W. D.* On the estimates of the ring current injection and decay // Earth, Planets and Space. — 2003. — **55**. — P. 427—435.
20. *Borovsky J. E., Denton M. H.* Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. — 2006. — **111**. — A07S08. doi:10.1029/2005JA011447
21. *Burton R. K., McPherron R. L., Russel C. T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. — 1975. — **80**. — P. 4202—4214.
22. *Campbell W. H.* Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distributions // J. Atmos. and Terr. Phys. — 1996. — **58**(10). — P. 1171—1187.
23. *Carrington R. C.* Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1859. — **20**. — P. 13—15.
24. *Cerrato Y., et al.* Geomagnetic storms: their sources and a model to forecast Dst index // Lect. Notes and Essays in Astrophys. — 2004. — P. 131—142.
25. *Cid C., Saiz E., Cerrato Y.* Physical models to forecast the Dst index: A comparison of results. Proc. Solar Wind 11 — SOHO 16 «Connecting Sun and Heliosphere» (Whistler, Canada, 12—17 June, 2005) (ESA SP-592). 2005. P. 116—119.
26. *Chapman S., Ferraro V. C. A.* A new theory of magnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. — 1931. — **36**. — P. 77—97, 171—186.
27. *Chapman S., Ferraro V. C. A.* A new theory of magnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. — 1932. — **37**. — P. 147—156.
28. *Chapman S., Ferraro V. C. A.* A new theory of magnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. — 1933. — **38**. — P. 79—96.
29. *Chapman S., Ferraro V. C. A.* A new theory of magnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr. — 1940. — **45**. — P. 245—268.
30. *Cheremnykh O. K., et al.* Nonlinear dynamics and prediction for space weather // Ukr. J. Phys. — 2008. — **53**, N 5. — P. 502—505.
31. *Cliver E. W., Kamide Y., Ling A. G.* Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. — 2000. — **105**. — P. 2413—2424.
32. *Despirak I. V., et al.* Development of substorm bulges during different solar wind structures // Ann. geophys. — 2009. — **27**. — P. 1951—1960.
33. *Dryer M., et al.* Magnetohydrodynamic modeling of interplanetary disturbances between the Sun and Earth // Astrophys. and Space Sci. — 1984. — **105**. — P. 187—208.
34. *Erlykin A. D., et al.* On the correlation between cosmic ray intensity and cloud cover. [arXiv:0906.4442v2].

35. *Eselevich V. G., Fainshtein V. G.* An Investigation of the Relationship between the Magnetic Storm Dst-index and Different Types of Solar Wind Streams // *Ann. geophys.* — 1993. — **11**(8). — P. 678—684.
36. *Fenrich F. R., Luhmann J. G.* Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity // *Geophys. Res. Lett.* — 1998. — **25**. — P. 2999—3002.
37. *Hapgood M. A.* Scientific Understanding and the Risk from Extreme Space Weather. [arXiv:0908.4349].
38. *Harrison R. F., Drezet P. M.* The application of an adaptive non-linear systems identification technique to the on-line forecast of Dst index. Proc. Les Woolliscroft memorial Conf. / Sheffield Space Plasma Meeting: Multipoint measurements versus theory (Sheffield, UK, Apr 24–26, 2001) (ESA SP-492). 2001. — P. 141—146.
39. *Hodgson R.* On a curious Appearance seen in the Sun // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1859. — **20**. — P. 15—16.
40. *Johnson J. R., Wing S.* A cumulant-based analysis of non-linear magnetospheric dynamics // Report PPPL-3919-rev. 2004. (http://www.pppl.gov/pub_report/2004/PPPL-3919rev.pdf).
41. *Joselyn J. A.* Geomagnetic activity forecasting — the state-of-the-art // *Rev. Geophys.* — 1995. — **33**. — P. 383—401.
42. *Khabarova O. V.* Current Problems of Magnetic Storm Prediction and Possible Ways of Their Solving // *Sun and Geosphere.* — 2007. — **2**(1). — P. 32—37.
43. *Khabarova O. V., et al.* Solar wind and interplanetary magnetic field features before magnetic storm onset // Proc. of the 8-th International Conference on Substorms. — Canada, 2006. — P. 127—132.
44. *Kivelson M. G., Russel C. T.* (eds.) Introduction to Space Physics. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.
45. *Kugblenu S., Taguchi S., Okuzawa T.* Prediction of the geomagnetic storm associated Dst index using an artificial neural network algorithm // *Earth Planets Space.* — 1999. — **51**. — P. 307—313.
46. *Lilensten J.* (ed.) Space Weather: Research Towards Applications in Europe // *Astrophys. and Space Sci. library.* — Dordrecht: Springer, 2007.
47. *Li X., et al.* The Predictability of the Magnetosphere and Space Weather. *Eos.* 2003. **84**(37).
48. *Lyatsky W., Newell P. T., Hamza A.* Solar Illumination as Cause of the Equinoctial Preference for Geomagnetic Activity // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — **28**. — P. 2353—2356.
49. Marubashi K. The space weather forecast program // *Space Sci. Rev.* — 1989. — **51**. — P. 197—214.
50. *McKenna-Lawlor S. M. P., et al.* Predicting interplanetary shock arrivals at Earth, Mars, and Venus: A real-time modeling experiment following the solar flares of 5–14 December 2006 // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113A**, N 6. — A06101. doi:10.1029/2007JA012577.
51. *Mikaelian T.* Spacecraft charging and hazard to electronics in space. [arXiv:0906.3884]
52. *Moos N. A. F.* Magnetic observations made at the government observatory, Bombay, for the period 1846 to 1905, and their discussion, Part II: the phenomenon and its discussion. Bombay, 1910.
53. *O'Brien T. P., McPherron R. L.* Forecasting the Ring Current Index Dst in Real Time // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* — 2000. — **62**(14). — P. 1295—1299.
54. *O'Brien T. P., McPherron R. L.* An empirical phase-space analysis of ring current dynamics: solar wind control of injection and decay // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105A**, N 4. — P. 7707—7720.
55. *O'Brien T. P., McPherron R. L.* Seasonal and diurnal variation of Dst dynamics // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107**. — 1341. doi:10.1029/2002JA009435.
56. *Odenwald S., Green J., Taylor W.* Forecasting the impact of an 1859-calibre superstorm on satellite resources // *Adv. Space Res.* — 2006. — **38**. — P. 280—297.
57. *Oh S. Y., Yi Y.* Relationships of the solar wind parameters with the magnetic storm magnitude and their association with the interplanetary shock // *J. Korean Astron. Soc.* — 2004. — **37**. — P. 151—157.
58. OMNI 2 Database. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>
59. *Pallochia G. et al.* ANN prediction of the Dst index // *Mem. Soc. Astron. ital. Suppl.* — 2006. — **9**. — P. 120—122.
60. *Palmer S. J., Rycroft M. J., Cermack M.* Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface // *Surv. Geophys.* 2006. — **27**. — P. 557—595.
61. *Parker E. N.* Kinetic properties of interplanetary matter // *Planet Space Sci.* — 1962. — **9**. — P. 461—475.
62. *Parnowski A. S.* Statistical approach to Dst prediction // *J. Phys. Studies.* — 2008. — **12**(4).
63. *Parnowski A. S.* Statistically predicting Dst without satellite data. *Earth, Planets and Space.* 2009. **61**(5). P. 621—624.
64. *Parnowski A. S.* Regression modeling method of space weather prediction // *Astrophys. and Space Sci.* — 2009. — **323**, N 2. — P. 169—180. doi:10.1007/s10509-009-0060-4. [arXiv:0906.3271]
65. *Pulkkinen T. I., et al.* Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // *Geophys. Res. Lett.* — 2007. — **34**. — L02105. doi:10.1029/2006GL027775.
66. *Pustilnik L. A., Yom Din G.* Space climate manifestation in Earth prices — from medieval England up to modern USA. (arXiv:astro-ph/0411165)
67. *Raeder J., et al.* Global simulation of the Geospace Environment Modeling substorm challenge event // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**. — P. 381—396.
68. *Rangarajan G. K., Barreto L. M.* Use of Kp index of geomagnetic activity in the forecast of solar activity // *Earth Planets Space.* — 1999. — **51**. — P. 363—372.

69. Romanova N. V., et al. Statistical Relationship between the Rate of Satellite Anomalies at Geostationary Satellites with Fluxes of Energetic Electrons and Protons // *Kosmicheskie Issledovaniya*. — 2005. — **43**(3). — P. 186—193.
70. Ryerson, et al. The Late Aurora Borealis and the Telegraph // *J. Education for Upper Canada*. — 1858. — P. 132.
71. Sagdeev R. Z. Cooperative phenomena and shock waves in collisionless plasmas // *Rev. Plasma Phys.* — 1966. — **4**.
72. Siscoe G., et al. Reconciling prediction algorithms for Dst // *J. Geophys. Res.* — 2005. — **110**. — A02215. doi:10.1029/2004JA010465.
73. Space Studies Board. Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report. Washington: National Academies Press, 2008.
74. Srivastava M. A logistic regression model for predicting the occurrence of intense geomagnetic storms // *Ann. geophys.* — 2005. — **23**. — P. 2969—2974.
75. Stewart B. On the Great Magnetic Disturbance Which Extended from August 28 to September 7, 1859, as Recorded by Photography at the Kew Observatory // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. — 1861. — **151**. — P. 423—430.
76. Stoupe E., et al. Clinical Cosmobiology — Sudden Cardiac Death and Daily/Monthly Geomagnetic, Cosmic Ray and Solar Activity — the Baku Study (2003—2005) // *Sun and Geosphere*. — 2006. — **1**(2). — P. 13—16.
77. Takalo J., Mursula K. A model for the diurnal universal time variations of the Dst index // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**. — P. 10905—10921.
78. Temerin M., Li X. A New Model for the Prediction of Dst on the Basis of the Solar Wind // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107A**, N 12. — 1472. doi:10.1029/2001JA007532.
79. Temerin M., Li X. D_{st} model for 1995—2002 // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111A**, N 4. — A04221. doi:10.1029/2005JA011257.
80. Valdivia J. A., Sharma A. S., Papadopoulos K. Prediction of magnetic storms by nonlinear models // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**(21). — P. 2899—2902.
81. Watanabe S., et al. Prediction of the Dst index from solar wind parameters by a neural network method // *Earth Planets Space*. — 2002. — **54**. — P. 1263—1275.
82. Wei H. L., Billings S. A., Balikhin M. A. Analysis of the geomagnetic activity of the Dst index and self-affine fractals using wavelet transforms // *Nonlinear Processes in Geophysics*. — 2004. — **11**. — P. 303—312.
83. Wing S., et al. *Kp* forecast models // *J. Geophys. Res.* — 2005. — **110**. — A04203. doi:10.1029/2004JA010500
84. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>
85. Zhou X.-Y., Wei F.-S. Prediction of recurrent geomagnetic disturbances by using adaptive filtering // *Earth Planets Space*. — 1998. — **50**. — P. 839—845.

Надійшла до редакції 01.10.09

A. S. Parnowski, Yu. I. Yermolayev, I. T. Zhuk

SPACE WEATHER: THE HISTORY OF RESEARCH AND FORECASTING

We describe some aspects of the space weather problem. The history of the problem is outlined. The existing space weather forecasting methods are reviewed, their advantages and drawbacks are analysed and some ways for further development are proposed. In particular, taking into account the large-scale structure of the solar wind enables us to improve the prediction accuracy for the Earth's magnetosphere and ionosphere state.