

Б. И. САЗОНОВ

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОЛНЕЧНО-ТРОПОСФЕРНЫХ СВЯЗЯХ

В последние годы были затрачены большие усилия на то, чтобы найти возможный механизм, посредством которого возмущения от Солнца передаются в нижние плотные слои атмосферы. Однако предложенные механизмы не дали возможности объяснить целый ряд фактов, известных из наблюдений. В статье обсуждаются возможности построения механизма передачи возмущения в плотные слои атмосферы посредством частиц высоких энергий, модулированных магнитными полями солнечных корпускулярных потоков. Обсуждается роль солнечных космических лучей, а также частиц высоких энергий внутреннего радиационного пояса Земли как посредников в солнечно-тропосферных связях.

Исследование связи Солнце—тропосфера в последние десятилетия испытывает определенные трудности и не развивается в столь широких масштабах, каких заслуживает этот чрезвычайно важный вопрос, главным образом потому, что физическая природа этой связи не вскрыта. Неясность механизма передачи возмущения от Солнца в тропосферу приводит к тому, что среди множества фактов, подтверждающих эту связь, есть и такие, которые на первый взгляд кажутся совершенно неправдоподобными. Назовем для примера лишь два из них. Как показали Вард и Лондон (см. например [8]), над Америкой отклонения температуры от нормы, а также наибольшая перестройка поля давления в стратосфере наблюдаются не в дни с большими магнитными бурями и не после этих дней, а за 3—5 дней до бури. Исследования этих авторов были выполнены с большой строгостью и не могут быть подвергнуты сомнению. Тем более странным кажется то, что для слабых магнитных возмущений такой связи обнаружено не было. Получается, что какой-то агент, возмущающий стратосферные слои за несколько дней до магнитной бури, до прихода корпускулярного потока к Земле, начинает «ощущать» движение этого потока. Ясно, что таким агентом может быть лишь такое излучение, которое обладает очень высокими скоростями распространения.

Второй факт заключается в том, что в годы высокой солнечной активности наблюдается некоторый спад в интенсивности общей циркуляции атмосферы, в то время как в годы минимума солнечной активности — вторичный максимум [8]. Причем этот максимум часто бывает выражен очень четко, хотя запятненность Солнца в этот период оживле-

ния общей циркуляции может быть минимальной, как и геомагнитная активность. Из этого опять-таки следует, что не корпускулярные потоки, испускаемые Солнцем, являются тем возмущающим агентом, который способствует оживлению общей циркуляции атмосферы.

Однако не менее заслуживающими доверия являются и те многочисленные работы, в которых показано, что в изменениях циркуляции атмосферы прослеживается 27-дневный период, связанный с неравномерным истечением корпускулярных потоков с поверхности Солнца и что в среднем (если не отбирать лишь самые большие магнитные бури) циркуляция атмосферы усиливается с усилением геомагнитной активности [6, 8].

Мы остановимся в этой работе лишь на этих мнимых противоречиях и попытаемся показать, что они легко разрешаются, если допустить, что агентом, возмущающим тропосферную и стратосферную циркуляцию, является не корпускулярный поток, а частицы высоких энергий. Такой подход позволяет разрешить и еще множество трудностей, которые до настоящего времени были, казалось, непреодолимыми. Для примера остановимся здесь лишь на двух. Первая трудность заключается в том, что, используя корпускулярные потоки в качестве возмущающего агента, нельзя объяснить того, почему связи Солнце—тропосфера не ослабевают при движении от полюса к экватору, а скорее, наоборот, даже усиливаются, что известно из многочисленных статистических проработок [6, 8]. Частицы корпускулярных потоков, имеющие энергии 10^3 — 10^4 эв, не в состоянии проникнуть на широты южнее 70-й параллели, что хорошо установлено и теоретическими, и экспериментальными методами [2]. Вторая трудность заключается в том, что на высотах 50—10 мб изменчивость температуры и давления ото дня ко дню и даже от недели к неделе необычайно мала в умеренных и субтропических широтах, между тем как в нижней стратосфере и тропосфере она велика и обнаруживает связь с солнечной активностью.

Если в качестве возмущающего агента рассматривать частицы высоких энергий, то эти трудности сразу же отпадают. Частицы высоких энергий не вносят заметной энергии в мезосферу и в более высокие слои, а поглощаются главным образом в стратосфере. Они способны проникать на любые географические широты, исключая разве приэкваториальные широты (30° с. ш.— 30° ю. ш.), где поток частиц существенно занижен благодаря большой напряженности и протяженности магнитного поля Земли. На эти широты способны приходить лишь частицы с большой жесткостью, поток которых очень стабилен во времени, а энергия ничтожна.

До настоящего времени основное внимание исследователей солнечно-тропосферных связей привлекали корпускулярные потоки, чему способствовал ряд обстоятельств. Предполагалось, что плотность протонов в этих потоках доходит до 10^3 частиц/см³, а общая энергия, притекающая на границу атмосферы, может доходить до 10^3 эрг/см² сек. Приблизженные подсчеты показывали, что этот приток энергии достаточен, чтобы при некоторых обстоятельствах (при высоком коэффициенте обмена, например) возмущения из верхних слоев атмосферы распространились в тропосферу [6]. Большая плотность солнечных корпускулярных частиц в потоках во всех случаях считалась необходимой, хотя авторы порой и придерживались различных точек зрения на механизм передачи возмущения.

Исследование околоземного космического пространства с помощью ракет и спутников показало, что в корпускулярных потоках плотность частиц составляет 1—4 протона/см² сек. [22], а, стало быть, не может

корпускулярный поток приносить к Земле ту энергию, которая необходима для того, чтобы возмущения из верхних слоев атмосферы передавались в нижние слои. Наблюдения над низкоэнергичными частицами, захваченными магнитным полем Земли [22, 24, 26], показывают, что лишь в зоне полярных сияний временами приток энергии может достигать величины $100 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$. Вне зоны полярных сияний приток энергии в ионосферные слои, по-видимому, на два порядка меньше.

В результате проведенных в период МГГ и МГС исследований в стратосфере вспышек космических лучей в последние годы произошли большие изменения взглядов геофизиков относительно роли космических лучей в ионизации нижней ионосферы, мезосферы и стратосферы. Оказалось, что частицы высоких энергий (протоны и альфа-частицы), выброшенные Солнцем, приносят в глубокие слои атмосферы значительную энергию, достигающую до нескольких эргов на квадратный сантиметр в секунду [29, 30].

Таким образом, не отрицая в принципе возможности влияния верхних слоев атмосферы на нижние в районах, близких к зоне полярных сияний, есть основания в то же время обратить особое внимание на частицы космических лучей. Хотя частицы космических лучей, даже солнечного происхождения, не несут большой энергии в атмосферу Земли, у них есть два существенных преимущества по сравнению с корпускулярными потоками: они вносят свою энергию сразу в глубокие слои атмосферы, их энергия может использоваться более рационально для перестройки барического поля, чем энергия корпускулярного потока или малоэнергичных частиц, захваченных магнитосферой. В самом деле, поглощение частиц с малой энергией в ионосфере не может обеспечить иную схему воздействия как: нагревание $\rightarrow$ перестройка барического поля $\rightarrow$ возникновение новой циркуляции на высотах $\rightarrow$ распространение этой циркуляции вниз $\rightarrow$ новая циркуляция в тропосфере. Заранее можно сказать, что эта схема — аналог тепловой машины, будет иметь очень низкий к. п. д., намного ниже к. п. д. известных тепловых машин. От энергии, вносимой в ионосферу, тропосфера не получит и одного процента энергии. Такой механизм, учитывая уровень наших знаний о корпускулярном излучении, вторгающемся в атмосферу, не может объяснить резкие перестройки барических полей, происходящие на протяжении двух-трех дней. Но отнюдь не очевидно, что такой механизм может оказаться неэффективным при рассмотрении среднемесячных или сезонных особенностей общей циркуляции.

При резких перестройках барического поля более эффективными могут оказаться потоки космических частиц, обладающих достаточной энергией для того, чтобы некоторую, в общем небольшую, массу воздуха переместить из одного района в другой. Такой механизм, предложенный в [8], как бы специально приспособлен для космических частиц. Дело в том, что частица, имеющая энергию 10^7 эв или больше, передает часть своей кинетической энергии и момента количества движения той частице, на которую она налетает. Затем две частицы движутся дальше до нового взаимодействия с частицами воздуха в противоположность корпускулярным частицам, которые взаимодействуют сразу со многими частицами атмосферы и быстро тормозятся, разогревая и ионизируя воздух на своем пути. В данной схеме кинетическая энергия частиц прямо переходит в кинетическую энергию движения воздуха. Если вторжение частиц корпускулярных потоков можно рассматривать как вливание горячего газа Солнца в холодный газ атмосферы Земли, то вторжение высокоэнергичных частиц в плотную атмосферу Земли можно интерпретировать как эффект «увлечения» движущимся газом

стоячего газа. Столь разная интерпретация, казалось бы, одного и того же явления — вторжения частиц космического происхождения в атмосферу Земли — связана прежде всего с особенностями взаимодействия частиц корпускулярных потоков и частиц космических лучей с частицами атмосферы.

На этом вопросе есть смысл остановиться несколько подробнее.

Поглощение протонов космических лучей и корпускулярных потоков в некотором веществе (например, в фотоэмульсии, которая делает процесс поглощения видимым) происходит совершенно по-разному. Пробег до поглощения медленного протона будет очень мал, но зато потери

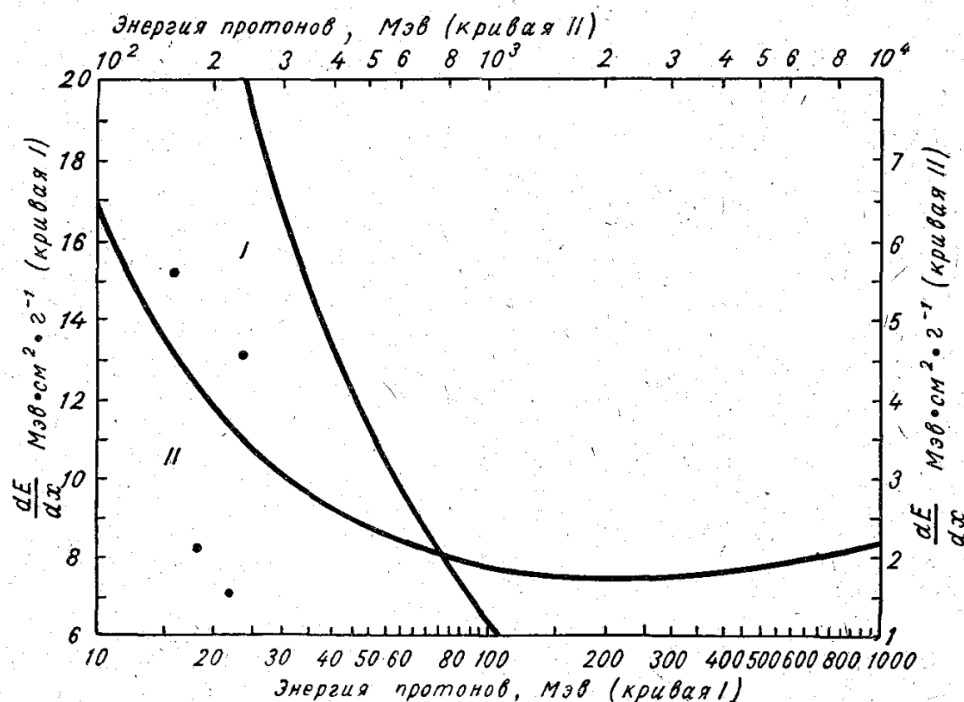


Рис. 1. Потери энергии протонов в слое поглотителя в зависимости от энергии протонов.

энергии на единицу пути будут очень велики. Потери будут определяться взаимодействием протона с электронами атомов и будут приводить к большой ионизации поглощающего вещества, а, стало быть, и к его разогреванию. При переходе к частицам космических лучей ионизационные потери протонов быстро уменьшаются и при энергиях порядка нескольких миллиардов электроновольт становятся минимальными [13]. На рис. 1 приведены два отрезка кривой, показывающей потери энергии в зависимости от энергии протона при прохождении стенки толщиной 1 г/см². Из графика видно, что благодаря снижению потерь на ионизацию с ростом энергии протон теряет все меньше энергии на единицу своего пути.

След, оставляемый протоном корпускулярных потоков в не очень плотном веществе, будет напоминать жирную точку, в то время как след протона космических лучей — длинную и тонкую прямую. Казалось бы, что в таком веществе, как воздух, и протоны корпускулярных потоков, и протоны космических лучей будут рассеивать свою энергию подобным образом. Однако это не так. Формула Резерфорда, которая описывает рассеяние одних заряженных частиц на других и справедливая для протонов корпускулярных потоков, оказывается не справедливой для протонов космических лучей [9, 13]. Оказывается, что рассеяние

протонов космических лучей на атомах воздуха происходит в очень узком телесном угле, направленном в ту же сторону, в какую двигалась энергичная частица; рассеяние в сторону здесь существенно ниже тех значений, которые даются формулой Резерфорда. Практически можно считать, что при энергиях в несколько миллиардов электрон-вольт при упругом рассеянии первичная частица не меняет своего направления движения [1], чего нельзя сказать о протонах корпускулярных потоков, которые в процессе рассеяния сильно отклоняются от своего первоначального направления.

При больших энергиях протонов существенную роль приобретают и неупругие взаимодействия, при которых некоторая доля энергии первичной частицы тратится на создание пи-мезонов и выбивание протонов, нейтронов, альфа-частиц и более тяжелых частиц — фрагментов из ядер атомов. Однако все эти вторичные частицы, исключая лишь мезоны [1], продолжают двигаться в том же направлении, в котором двигалась первичная частица, испытывая как упругие, так и неупругие взаимодействия. В лабораторной системе координат неупругие взаимодействия не вносят ничего принципиально нового в процесс рассеяния энергии протонов большой энергии — после взаимодействия частицы движутся в узком телесном угле, направленном в сторону движения первичной частицы.

Появление быстрых нейтронов может оказаться важным фактором в передаче кинетической энергии и момента к частицам воздуха в нижней тропосфере от частиц космических лучей, поскольку эти нейтроны почти не поглощаются в атмосфере. Однако данные о быстрых нейтронах, как и вообще данные об энергетическом балансе космического излучения в атмосфере, необычайно скудны [5].

Резюмируя вышесказанное, мы можем отметить, что частицы космических лучей как солнечного, так и галактического происхождения, имея энергии от нескольких десятков миллионов электрон-вольт и выше, могут, по-видимому, наводить некоторый упорядоченный перенос масс воздуха в нижних плотных слоях атмосферы, затрачивая на это часть своей кинетической энергии. В первом приближении доля этой энергии равна нескольким десятым от всей энергии, вносимой космическими частицами.

Следует отметить, что вопрос о влиянии космических лучей на погоду не нов [2], хотя и очень слабо разработан. Сейчас хорошо известно и изучено влияние погоды, особенно давления воздуха, на уровень космических лучей, регистрируемый у поверхности Земли. Исследователи космических лучей не исключают возможности и обратного воздействия космических лучей на погоду, но вопрос этот требует специальных исследований.

Вопрос о влиянии космических лучей на погоду, вероятно, можно было бы решить сразу, если бы мы знали те максимально возможные энергии, которые иногда в некоторые районы вносят космические лучи. Однако таких сведений нет и, вероятно, они не появятся и в ближайшие годы. Мы можем говорить сейчас лишь о некоторых осредненных как во времени, так и в пространстве данных, которые могут быть весьма далеки от тех экстремальных значений, которые только и имеют определенные шансы оказать воздействие на тропосферную циркуляцию.

На рис. 2 приведены кривые дифференциальных спектров частиц, вторгающихся в атмосферу Земли. По горизонтали отложена энергия частиц, по вертикали — их поток. Схема, приведенная на рис. 2, в какой-то мере обобщает все сведения, которые получены к настоящему моменту относительно заряженных частиц, регистрируемых как в атмо-

сфере Земли, так и в околоземном пространстве. Спектры частиц, приходящих к Земле в период геомагнитных бурь, а также спектры протонов в солнечном ветре неизвестны, поэтому на рисунке лишь показаны кружками те области, в которых эти частицы находятся.

Из рассмотрения рис. 2 можно сделать заключение, что в атмосферу Земли вторгаются по существу лишь два типа частиц: мягкие — с энергией менее 10^6 электрон-вольт и жесткие — с энергией более 10^7 электрон-вольт или космические лучи. Первые вносят свою энергию главным образом в ионосферные слои, вторые — в стратосферу. По-видимому,

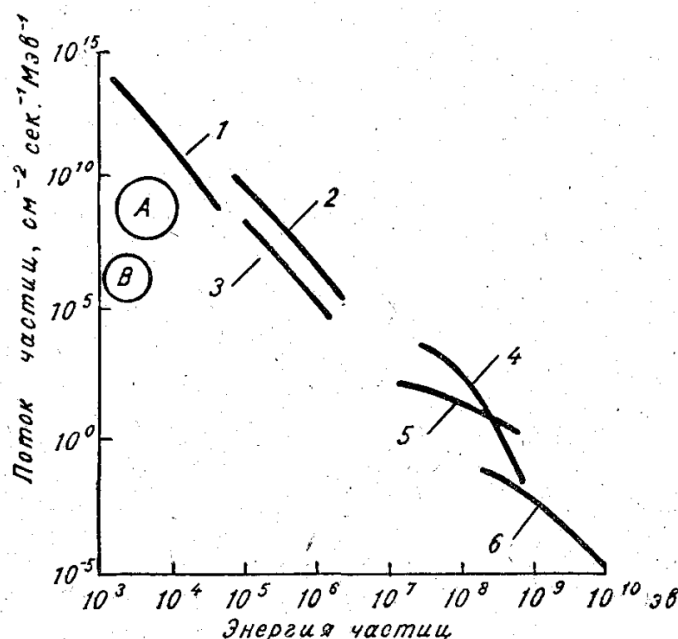


Рис. 2. Дифференциальные спектры частиц по данным измерений, сделанных в различных частях околоземного космического пространства и в атмосфере Земли. А — протоны геомагнитных бурь, В — протоны солнечного ветра, 1 — электроны полярных сияний, 2 — электроны радиационных поясов Земли, 3 — протоны внешнего радиационного пояса, 4 — протоны солнечных вспышек, 5 — протоны внутреннего радиационного пояса Земли, 6 — протоны галактических космических лучей.

разрыв в энергиях частиц в области 10^6 — 10^7 реален, хотя есть и определенные технические трудности в измерении протонов таких энергий.

Если предположение о роли космических лучей в изменении барического поля и, следовательно, погоды не лишено оснований, то следует рассмотреть несколько подробнее особенности каждого из трех источников космических лучей: солнечных вспышек, внутреннего радиационного пояса Земли и Галактики.

Вспышки солнечных космических лучей, открытые относительно недавно, интенсивно изучались за последние 7—8 лет. Имеются обстоятельные обзоры, подводящие итог проделанной работе [2, 16, 30]. Приводим схему на рис. 3, изучение которой позволяет ответить на вопросы, связанные с высотой поглощения солнечных частиц разных энергий в атмосфере, месте (широте) их вторжения в атмосферу Земли, времени запаздывания их прихода к Земле по отношению ко времени их инжекции на Солнце.

Особенностью спектра солнечных космических частиц [10, 11, 30] является их довольно высокая плотность при энергиях в десятки миллионов электрон-вольт и быстрое уменьшение плотности частиц при

переходе к большим энергиям. Спектр имеет перелом около энергии в 100 млн. эв (Мэв).

С достаточной для практических целей точностью дифференциальные спектры описываются выражениями вида

$$N(E)dE = KE^{-\alpha} \cdot dE,$$

где $N(E)$ — число частиц данной энергии E , α — показатель крутизны спектра, K — коэффициент пропорциональности. Для частиц с энергией более 100 Мэв для солнечных потоков космических частиц $\alpha=5-6$.

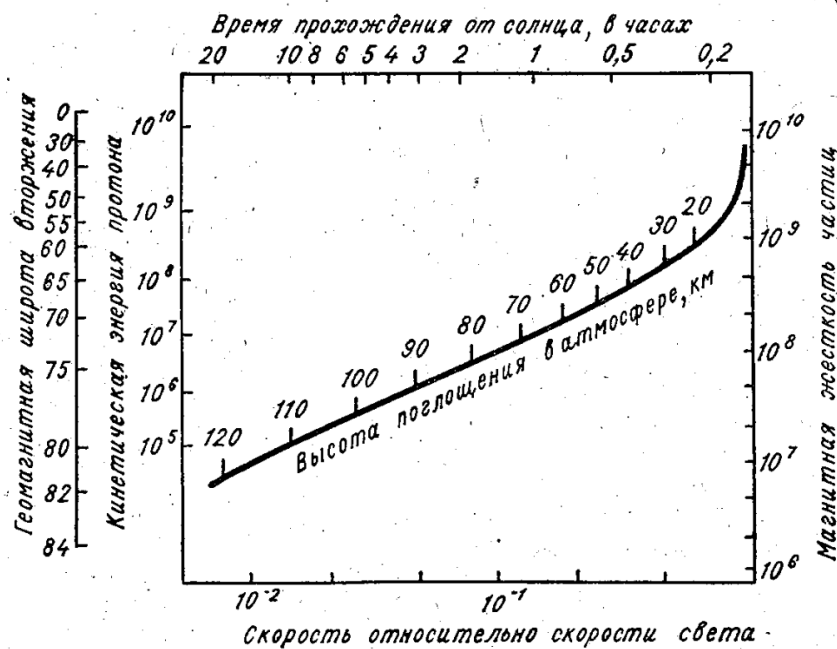


Рис. 3. Некоторые характеристики солнечных протонов и взаимосвязь между ними.

Спектры галактических космических лучей, а также спектры частиц высоких энергий, захваченных во внутренний радиационный пояс Земли, существенно отличаются от солнечных космических частиц, у них $\alpha=2,5$ [7, 10, 19].

Рассмотрим, как может отразиться это различие в крутизне дифференциального спектра на характере поглощения энергии этих частиц в атмосфере. Возьмем конкретный дифференциальный спектр протонов во внутреннем радиационном поясе Земли на высотах порядка 1000 км. Спектр этот неоднократно измерялся с помощью ракет и специальных установок [15, 17, 23].

На рис. 4 приведены данные, заимствованные из [19]. Точками показаны данные, полученные из экспериментов, сплошными кривыми — результаты теоретических вычислений по двум разным методам [15, 19]. Видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. На рис. 5 приведен поперечный разрез внутренней радиационной зоны. Изолинии показывают интенсивность потока протонов, приходящих на 1 см^2 в секунду. Спектр, приведенный на рис. 4, измерен на одном из концов внутреннего радиационного пояса, вдали от его центра.

Интересно отметить, что рассматриваемый спектр отдаленно напоминает спектр солнечных космических лучей тем, что наибольшую энергию здесь также вносят в атмосферу Земли частицы с энергией, близкой к 100 Мэв. Но вместе с тем довольно пологий характер этого спектра делает его похожим на спектр галактических космических лу-

чей. Естественно, мы не касаемся здесь вопроса об абсолютной интенсивности частиц в сравниваемых спектрах.

Сейчас имеется достаточный материал для того, чтобы утверждать, что определенная доля частиц, захваченных во внутренний радиационный пояс, способна периодически, во время больших возмущений магнитного поля Земли, покидать его [25] и по силовым магнитным линиям уходить в атмосферу Земли. Спектр этих частиц не известен, но можно

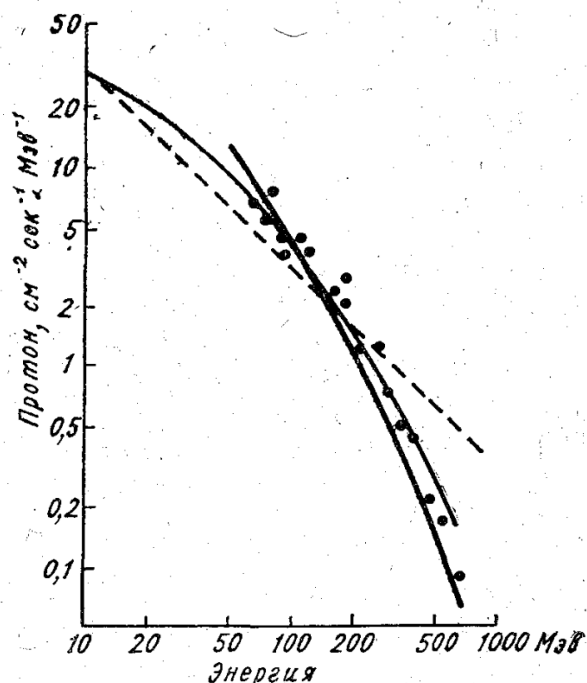


Рис. 4. Дифференциальный спектр протонов внутреннего радиационного пояса Земли.

предполагать, что он должен быть либо близок к приведенному на рис. 4, либо еще более пологий. Последнее можно обосновать тем, что, как показывают теоретические разработки [14, 31], радиационный пояс при возмущении магнитного поля прежде всего должны покидать более энергичные частицы, распространенность которых в потоке, идущем в атмосферу, должна быть повышена. Иными словами, может случиться, что $\alpha=1$ или близок к единице. На рис. 4 такой спектр показан штрихами.

Итак, рассмотрим два условных спектра, один с перегибом у энергии 100 Мэв (спектр 1), второй — гладкий (спектр 2). Примем, что при энергии 10 Мэв интенсивность спектра 1 $30 \text{ прот./см}^2 \text{ сек.} \cdot \text{Мэв.}$ при энергии 100 Мэв — 10; далее крутизна спектра $\alpha=2,5$.

У спектра 2 по всему диапазону энергий $\alpha=1$. Поток энергии в обоих спектрах равен.

Поскольку энергия протонов в солнечных космических лучах, а также во внутренней радиационной зоне Земли не превышает 600 Мэв, что установлено достаточно надежно по экспериментальным данным, то можно предполагать, что взаимодействия с ядрами атомов воздуха не играют для этих частиц большой роли и основная энергия расходуется благодаря упругим взаимодействиям. Из этого можно сделать вывод, что, входя в атмосферу Земли, частица сначала затрачивает очень мало энергии, а затем, замедляясь, тратит ее все больше и, наконец, перед самой остановкой в нескольких десятках или сотнях метрах пути оставляет львиную долю своей энергии. Вообще расчет притоков энергии к отдельным слоям атмосферы при заданном дифференциальном спектре частиц в потоке произвести технически весьма трудно, тем более, что, как показывают исследования, в рассматриваемом диапазоне энергий нельзя пренебрегать и неупругими соударениями [15, 19].

Для простоты мы примем, что вся энергия протона в рассматриваемом диапазоне передается частицам воздуха лишь в самом конце его пути в атмосфере. Используя это упрощение, которое не является слишком грубым, мы можем схематически показать характер поглощения энергии в атмосфере в зависимости от крутизны дифференциального спектра.

На рис. 6а приведены две кривые, показывающие величину энергии, вносимой в различные слои атмосферы. Расчет произведен для 2-километровых слоев воздуха. Обращает на себя внимание тот факт, что кривая для спектра 2 дает ясно выраженный пик для притока энергии в нижней стратосфере. Этот факт интересен тем, что приток энергии в различных интервалах энергий в спектре 2 постоянен, но поскольку в нижней стратосфере поглощается большая часть спектра, то закономерно появляется в этом слое и максимум в поглощенной энергии. В спектре же 1 максимум энергии наблюдается где-то на высотах 30—35 км, где поглощаются частицы с энергией около 100 Мэв (эти частицы вносят наибольшую энергию при спектре 1).

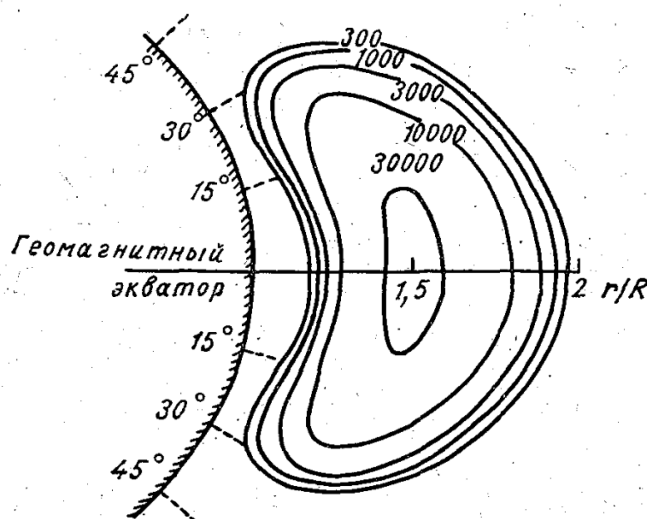


Рис. 5. Интенсивность потока частиц космических лучей (протон $\text{см}^{-2} \text{сек.}^{-1}$ во внутреннем радиационном поле Земли)
 r — расстояние от центра Земли, R — радиус Земли.

Рассмотрев рис. 6а, мы можем сделать следующий вывод: чем более пологий спектр имеет поток протонов, тем больше энергии внедряется в нижнюю стратосферу при прочих равных условиях. Поскольку дифференциальный спектр солнечных протонов очень круто спадает при энергиях более 100 Мэв, то для этого случая спектр 1 ниже 33 км будет иметь вид, схематически показанный штрихами на рис. 6а, т. е. в этом спектре практически может наблюдаться лишь один максимум поглощения энергии на высотах 30—35 км.

Все сказанное выше приводит к определенным весьма важным выводам. В случае, если солнечные высокоэнергичные протоны оказывают какое-то воздействие на тропосферную циркуляцию, то возмущения должны начинаться на высотах 30—35 км в полярных широтах. На широтах южнее 50° геомагнитной широты или на каких-то иных высотах, существенно отличных от указанных высот, связь хромосферные вспышки — тропосфера не должна работать (см. рис. 3).

Если допустить, что приток протонов с неизменным спектром наблюдался 10^5 сек. и вся энергия передавалась частицам воздуха, то можно подсчитать среднюю скорость горизонтального переноса для спектра 1 и 2. Рисунок 6б интересен в том отношении, что из него следует важный вывод о непременном уменьшении скорости ветра с глубиной атмосферы для самых различных спектров.

На рис. 6в показан перенос массы воздуха за 10^5 сек. через вертикальный створ высотой 2 км и шириной 1 см со скоростями, указанными

на рис. 6 б. Здесь интересно отметить то, что нижняя стратосфера, несмотря на небольшие скорости ветров, наведенных в ней потоком протонов, оказалась наиболее эффективна в отношении переноса масс воздуха из одних районов в другие.

Приведенным на рисунках 6 а, б и в числовым значениям не следует придавать большого значения, поскольку все они вычислены с принятием целого ряда допущений. Однако приведенные данные дают возможность указать на, вероятно, большую роль, которую может играть слой на высоте 15—20 км для связей Солнце—тропосфера. Значение слоя на высотах около 15 км еще более возрастает, если учесть, что

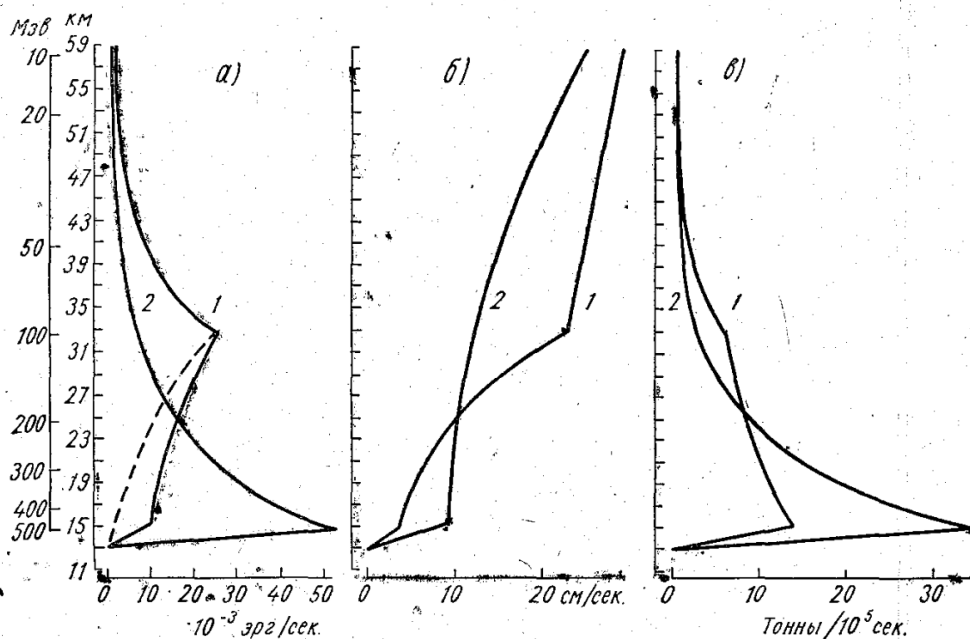


Рис. 6. Профили поглощенной энергии в атмосфере для двух выбранных дифференциальных спектров космических лучей (а), профили средней скорости ветра в атмосфере, наведенной за период 10^5 сек. космическими лучами (б), кривые перемещенной по горизонтали массы воздуха за 10^5 сек. в двухкилометровых слоях (в).

пробег для поглощения протонов очень высоких энергий, более биллиона электрон-вольт (Бэв), остается более или менее постоянным и равным 120 г/см^2 [7]. Из этого следует, что большая часть энергии и галактических космических лучей как в годы максимума, так и в годы минимума солнечной активности поглощается в стратосферных слоях, близких к 15 км [2].

Иными словами, и галактические космические лучи, и космические лучи, выходящие из магнитосферы, наибольшую энергию и наибольшие возмущения вносят в нижнюю стратосферу и, если их воздействие на тропосферные слои может быть значимым при определенных условиях (например, при значительном уплотнении потока частиц), то начинаться такие возмущения должны на высотах около 15 км.

На рис. 7 приводится кривая для одного случая необычной ионизации в атмосфере, наблюдавшейся прибором, поднятым в стратосферу на станции космических лучей в Бисмарке, Северная Дакота, США [4]. Обращает на себя внимание тот факт, что 15/X профиль ионизации был нормальным, но 16/X ионизация на высотах $60\text{—}100 \text{ г/см}^2$ резко возросла. Обращает на себя внимание и тот факт, что выше этого уровня ионизация оставалась нормальной. В результате прихода солнечных

протонов ионизация в стратосфере, как правило, растет с высотой. В рассмотренном случае в стратосферу, по-видимому, вторглись лишь высокоэнергичные частицы, которые без потерь энергии прошли слой воздуха 50 г/см^2 . Авторы работы [4] предполагают, что это были энергичные частицы, вышедшие из радиационных поясов Земли.

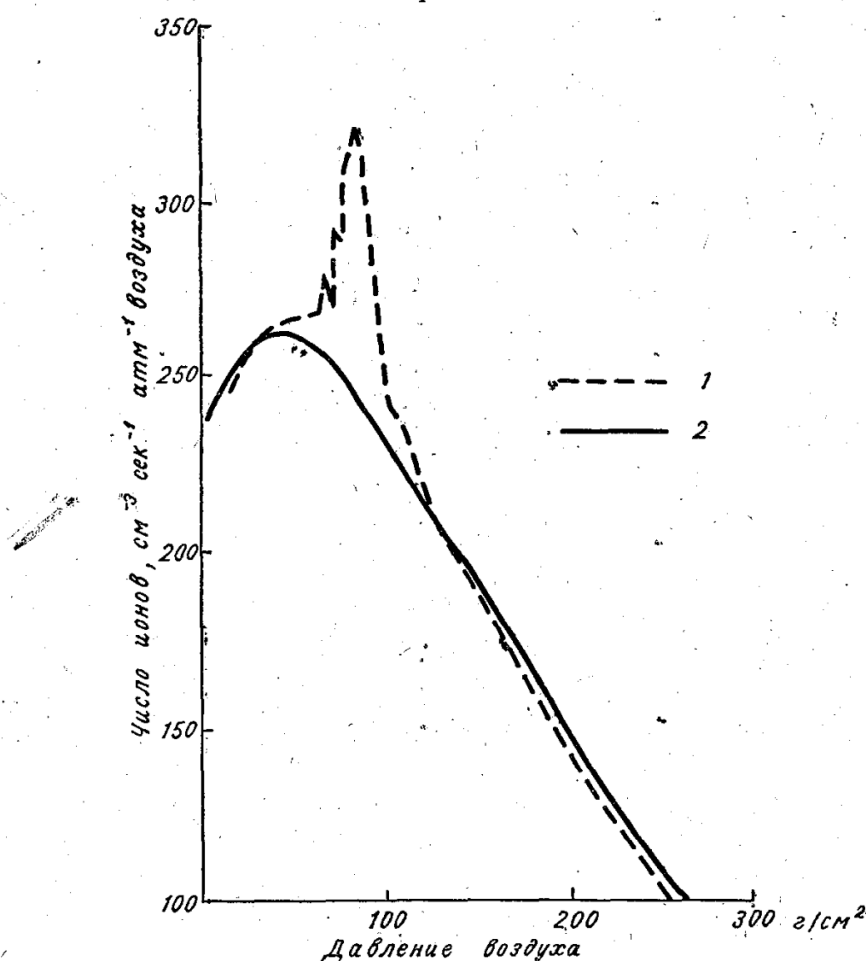


Рис. 7. Аномальное повышение ионизации на высотах около 15 км, вызванное притоком космических лучей 16/X 1958 г. в Бисмарке (Дакота, США) (1). Для сравнения показан (2) нормальный ход ионизации по вертикали, измеренный 15/X того же года на той же станции.

Все предположения о роли частиц высоких энергий в возмущении тропосферной циркуляции могут выглядеть более или менее обоснованно лишь в том случае, если удастся показать, что такое излучение входит в плотные слои атмосферы Земли анизотропно, т. е. имеется какое-то преимущественное направление перед всеми остальными направлениями, поток энергии из которого особенно велик.

Приток солнечных протонов в полярные области Земли, по-видимому, может быть и направленным, и диффузным. Но если учесть, что солнечные протоны, прежде чем достичь Земли, как правило, захватываются магнитными полями солнечных корпускулярных потоков [12], то можно предполагать, что анизотропия появляется у этих потоков уже в космосе. Это должно приводить к появлению локальных районов вторжения, к появлению преимущественных направлений движения, отличных от вертикали [2]. В таком случае объяснить передачу кинети-

ческой энергии от космических частиц частицам воздуха не представляет большой трудности [8].

Можно предполагать, что нечто подобное происходит и в том случае, когда корпускулярный поток захватывает не частицы, выброшенные из хромосферных вспышек, а частицы галактических космических лучей. Хорошо известно, что большая часть геомагнитных бурь приводит к появлению четкой анизотропии в галактических космических лучах [2], которые в периоды отсутствия магнитных бурь строго изотропны. Появление некоторого преимущественного направления в космосе в период геомагнитной бури приводит к тому, что космические лучи начинают притекать в атмосферу Земли лишь в определенные локальные зоны; как это в свое время было предсказано Штермером, появляется четко выраженный суточный ход космических лучей. Не касаясь в деталях появления анизотропии, о чем можно прочесть, например в [3], отметим, что корпускулярные облака при определенных условиях могут быть и весьма мощными накопителями частиц галактических космических лучей.

В 1958 г. Зингером [28] был предложен антифермиевский механизм замедления частиц космических лучей в расширяющихся облаках солнечной плазмы. Этот механизм наиболее полно объяснил самые разнообразные вариации космических лучей как коротких, так и длинных периодов. Расширяющееся корпускулярное облако, двигаясь от Солнца к Земле, постоянно накапливает в себе космические частицы за счет того, что вероятность выхода частиц из облака уменьшается пропорционально времени, которое частица находится в облаке. Проникая в расширяющееся облако, частицы космических лучей теряют свою энергию, радиус кривизны их движения в магнитных полях облака уменьшается и, в конечном счете, вероятность покинуть облако уменьшается, а общее число частиц возрастает. В момент вторжения Земли или другой планеты в такой поток космические лучи должны интенсивно поглощаться в атмосфере. Космические лучи из магнитного поля корпускулярного потока должны переходить в магнитное поле Земли. Вторжение этих частиц в определенные «ударные зоны» Штермера должно приводить к поглощению энергии в некоторых районах Земли в стратосфере, на высотах около 15 км. Частицы космических лучей свободно могут проникать на различные широты.

Как видим, трудности, указанные в начале статьи, могут легко быть разрешены, если принять, что агентом, возмущающим тропосферные барические поля, являются частицы космических лучей.

Находит простое объяснение и факт опережения реакцией атмосферы момента прихода корпускулярного потока к Земле (скорость распространения космических лучей в десятки раз больше скорости корпускулярных потоков) и факт оживления атмосферной циркуляции в минимуме солнечной активности. (Как известно, лишь в годы минимума солнечной активности галактические космические лучи беспрепятственно приходят к Земле и общая энергия, приносимая ими, возрастает.) В годы максимума солнечной активности низкоэнергичная часть космических лучей оказывается «выметенной» магнитными полями корпускулярных потоков за пределы орбиты Земли. Именно поэтому чрезвычайно слабые корпускулярные потоки из M областей в минимуме солнечной активности, накапливая частицы космических лучей, приносят к Земле большие «заряды» тропосферноактивных частиц. С этих позиций легко объяснить тот факт, что мощные корпускулярные потоки в максимуме солнечной активности, как правило, оказываются малоэффективными. Кроме того, что предшествующие потоки мешают под-

ходу космических частиц к последующим потокам и их накоплению в последних, в максимуме солнечной активности могут наблюдаться и столкновения одних корпускулярных потоков с другими. Все это, безусловно, не способствует накоплению космических частиц в корпускулярных потоках, а стало быть, и эффективности геомагнитных бурь для возмущения общей циркуляции атмосферы. Только в годы, близкие к минимуму солнечной активности, возникают идеальные условия для накопления космических частиц в редких и слабых корпускулярных потоках. В этот период, как показывают наблюдения, почти все магнитные бури, наблюдаемые на Земле, как-то связаны бывают с одновременным оживлением тропосферной циркуляции [6, 8].

Вопрос об анизотропии космических лучей, захваченных во внутренний радиационный пояс Земли, решается достаточно просто. Все заряженные частицы, захваченные магнитными полями, не могут существовать, оставаясь в этом поле, иначе как находясь в постоянном вращательном движении. При этом для протонов радиус криволинейной траектории равен

$$r_p = \frac{143 \sqrt{W}}{H},$$

где W — энергия протона в электрон-вольтах, H — напряженность магнитного поля в эрстедах. Подставляя характерные для внутреннего радиационного пояса величины: $W = 10^8$ эв, $H = 0,1$ э, найдем, что радиус кривизны траекторий измеряется многими десятками километров. Легко понять, что протон при смещении «зеркальных точек» к поверхности Земли может оказаться в таком положении, при котором самый нижний участок его траектории попадет в плотные слои атмосферы. На рис. 8 схематично показана такая ситуация. На силовую магнитную линию навивается спиральная траектория протона. В «зеркальной точке» 3 движение протона к Земле прекращается, после чего, если не произошло его поглощение, протон начинает двигаться от Земли. В этом и заключается «захват» заряженной частицы магнитным полем. В периоды геомагнитных бурь «зеркальные точки» сдвигаются в стороны от экватора, приближаясь к поверхности Земли [14, 31], а траектории частиц проникают в плотные слои земной атмосферы, где и происходит их поглощение.

Поскольку все траектории касаются плотных слоев атмосферы лишь теми своими частями, которые расположены ближе к поверхности Земли, а верхние отрезки траекторий проходят через очень разреженные слои воздуха, то и возникает анизотропное поглощение частиц, движущихся с запада на восток. Из этих же соображений следует, что между космическим пространством и плотными слоями Земли должен существовать анизотропный поток частиц [20]. Эта анизотропия, носящая название западно-восточной асимметрии, неоднократно наблюдалась в стратосфере с самолета. Недавно она была измерена и с по-

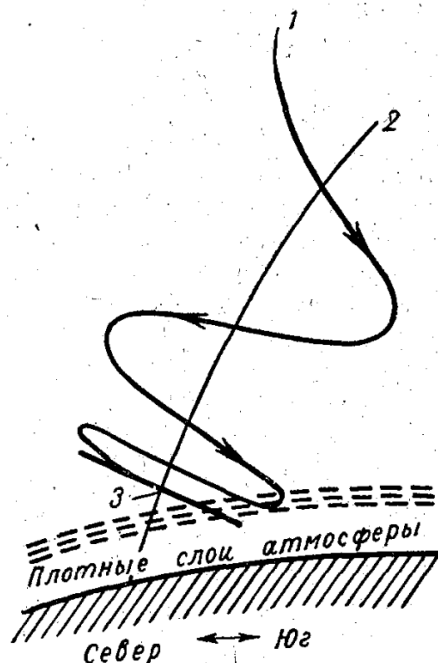


Рис. 8. Траектория вторжения в северном полушарии Земли протона высокой энергии (1), двигающегося вдоль силовой линии магнитного поля Земли (2) в плотные слои атмосферы. Зеркальная точка расположена (3) аномально низко.

мощью ориентированного спутника, поднятого на высоты 178—407 км [18]. Было показано, что с ростом энергии протонов на этих высотах быстро растет западно-восточная асимметрия. Если при энергии 60 Мэв интенсивность потока, идущего с запада лишь в 1,5 раза больше интенсивности потока, идущего с востока, то при энергиях протонов 116 Мэв это отношение возрастает до 5,5. Для больших энергий измерений пока нет, но с уверенностью можно сказать, что восточно-западная асимметрия должна увеличиваться и далее.

Подводя итог сказанному, мы можем отметить, что высоты больше 30 км над полярными областями Земли и около 15 км над умеренными и субтропическими широтами должны быть своеобразными источниками возмущений в том случае, если частицы космических лучей вносят какой-либо вклад в возмущения тропосферной циркуляции. Для протонов солнечных космических лучей лучшие связи установлены с солнечными хромосферными вспышками, радиоизлучением Солнца и полярными поглощениями в ионосфере. С этими показателями и должна коррелировать тропосферная циркуляция в полярных широтах. Возмущения же в умеренных и субтропических широтах, если выдвинутые соображения справедливы, должны обнаруживать определенную связь с геомагнитными бурями. Именно геомагнитные бури будут приносить к Земле галактические космические лучи с достаточно большой плотностью энергии и анизотропией. Только в условиях геомагнитных бурь захваченные магнитосферой частицы в большом количестве способны внедряться в плотные слои атмосферы.

Наконец, в условиях геомагнитной бури в магнитосфере Земли способны ускоряться частицы малых энергий. Вопрос этот до конца еще не исследован, экспериментальных данных, подтверждающих это, очень мало и они противоречивы. Но, если даже такие ускоренные частицы способны появляться в большом количестве в магнитосфере, их судьба, по-видимому, не будет слишком сильно отличаться от частиц внутреннего радиационного пояса Земли: некоторые из них сразу покинут магнитное поле Земли, другие на более или менее длительный срок будут захвачены в своеобразные магнитные «ловушки».

Чтобы не складывалось впечатление, что затронутые в настоящей статье вопросы имеют лишь частный интерес и что интересы современной метеорологии весьма далеки от них, мы остановимся в заключении на двух небольших вопросах, в понимании которых до сих пор нет достаточной ясности.

Первый вопрос относится к несколько необычному поведению слоя нижней стратосферы в умеренных широтах. Часть «странностей» этого слоя уже обсуждалась в [8]. Здесь мы остановимся на одной и, возможно, наиболее важной особенности этого слоя, — на аномально большой изменчивости плотности воздуха в нем. На рис. 9 кривая I показывает относительную изменчивость (%) плотности воздуха за зимние месяцы (январь—февраль) по 50 европейским станциям. Эта характеристика вычислялась следующим образом: на каждом уровне атмосферы определялась амплитуда колебания плотности, которая относилась к средней плотности, вычисленной по многолетним данным для данного уровня. Поскольку экстремальные значения плотности в силу инструментальных ошибок могли быть сильно искажены, для определения амплитуды выбирались две точки, которые отсекали 95% всех значений, превышающих норму, и 95% значений плотности ниже нормы. Данные выше 26—28 км о плотности воздуха мало надежны.

Из рис. 9 видно, что уверенно можно говорить о существовании по крайней мере трех слоев большой изменчивости плотности в атмосфере:

у поверхности земли, на высоте 13—16 км и где-то в верхней стратосфере или еще выше. Природа первого слоя большой изменчивости плотности очевидна, если обратить внимание на средние по европейским станциям амплитуды колебания температуры зимой (кривая 3). Большая изменчивость температуры воздуха в нижнем 2-километровом слое воздуха, несомненно, является одной из важнейших причин большой изменчивости плотности в этом слое. Два других, наиболее мощных слоя большой изменчивости плотности совпадают со слоями минимальных температурных колебаний, и одно это заставляет нас думать, что

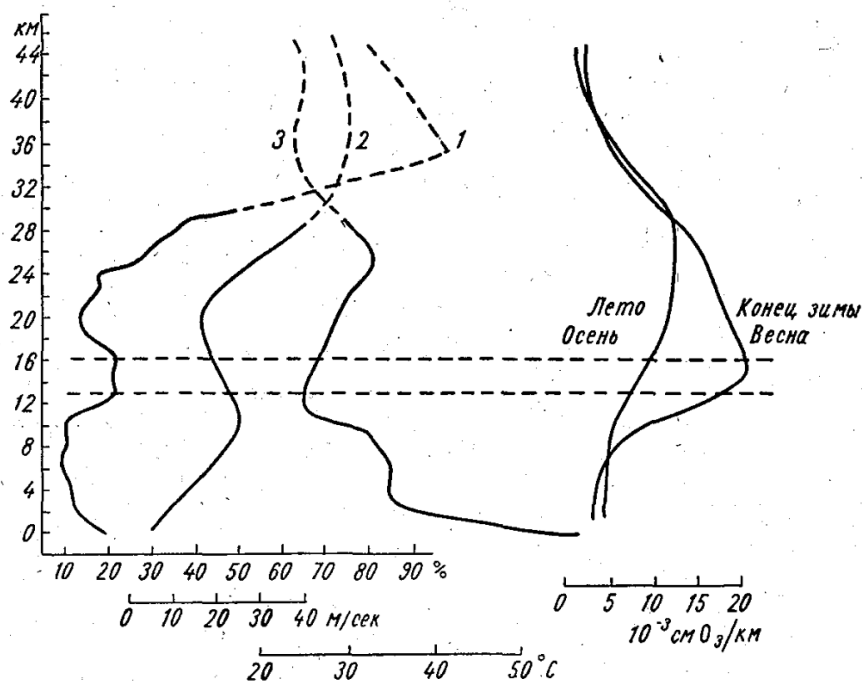


Рис. 9. Сравнение высотных кривых относительной изменчивости плотности в атмосфере зимой (1), средней скорости ветра (2) и средней амплитуды температуры (3) с кривыми вертикального распределения озона. Следует обратить внимание на совпадение высот нижнего максимума озона и максимума относительной изменчивости плотности воздуха зимой; летом и осенью в период ослабления атмосферной циркуляции эти максимумы не прослеживаются.

природа этих слоев большой изменчивости плотности в чем-то отлична от природы первого слоя. Со средней скоростью ветров (кривая 2) указанные три слоя, по-видимому, никак не связаны.

Таблица 1

Высота, км	1	2	3	4	5	7	9	11	13
Восточная Европа и									
Западная Сибирь . . .	0,33	0,64	0,75	0,87	0,90	0,91	0,74	—0,18	—0,22
Западная Европа . . .	0,42	0,66	0,77	0,84	0,85	0,86	0,71	—0,19	—0,28

В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции между температурой и давлением на разных уровнях в атмосфере, вычисленные по 14 станциям Восточной Европы и Западной Сибири за 1958—1959 гг. В крайней правой колонке приведены те же величины, вычисленные Дайнсом по сети станций Западной Европы по материалам, полученным в конце прошлого века и первом десятилетии текущего столетия (данные опубликованы в 1919 г.). Видно хорошее согласие приводимых данных, из

которых ясно, что в тропосфере рост давления, как правило, сопровождается и ростом температуры, в то время как в нижней стратосфере существует скорее обратная связь между давлением и температурой. По нашему мнению, появление обратной связи между давлением и температурой в нижней стратосфере может явиться ключом к пониманию многих особенностей тропосферной циркуляции. Большая изменчивость плотности в нижней стратосфере, возможно, и является отражением некоторого исключительного положения, в котором находится слой воздуха на высоте 15 км к поглощению энергии частиц высоких энергий.

Вторая особенность этого слоя, на которой мы хотели бы остановиться, заключается в том, что именно здесь содержание озона испытывает целый ряд вариаций, убедительного объяснения которым до сих пор не дано. В конце зимы и весной именно в этом слое наблюдается отчетливый максимум в концентрации озона, именно в этом слое

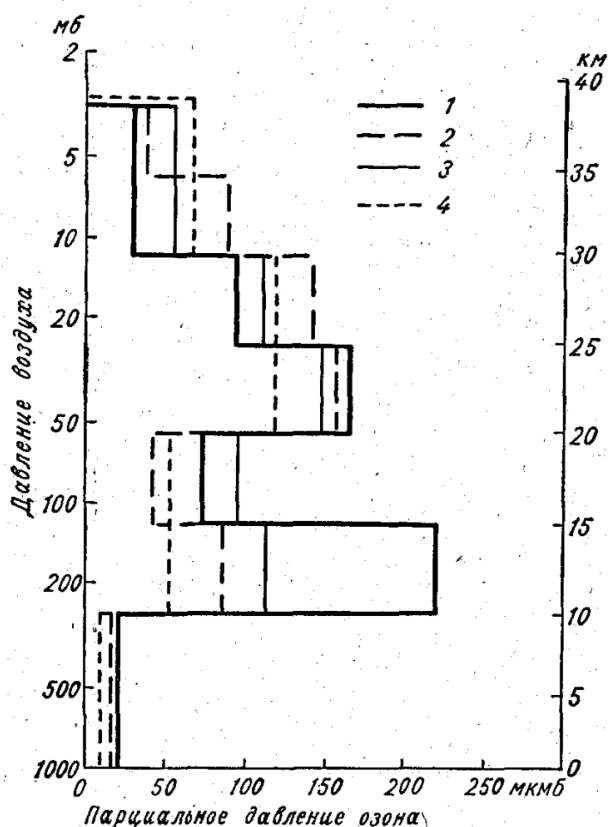


Рис. 10. Вертикальное распределение парциального давления озона в некоторые дни для одной из австралийских станций:

1 — 21/IX 1962 г., 2 — 3/X 1962 г., 3 — 5/XI 1962 г., 4 — 12/III 1963 г.

20 км наблюдается в весенне-зимний период отчетливый минимум в общей концентрации озона, отделяющий два максимума концентрации озона.

На рис. 10 приведены данные по вертикальному распределению озона на одной из австралийских станций [27]. Хорошо видно, что максимум в слое 10—15 км в весенний период постоянно отделен от главного максимума минимумом на уровне 15—20 км.

Объяснение нижнего максимума озона в зимне-весенний период чрезвычайно просто может быть дано с помощью энергии, вносимой в этот слой космическими лучами. Хорошо известно, что для расщепле-

изменение концентрации особенно четко связано с особенностями строения барического поля в тропосфере.

На рис. 9 кривые показывают типичное изменение концентрации озона по вертикали летом—осенью и зимой—весной [21]. Нет никакого сомнения в том, что на высотах более 30 км концентрация озона полностью определяется фотохимическим равновесием. Ниже 25 км ультрафиолетовая радиация практически не проникает и роль ее в образовании озона здесь минимальна. Попытки объяснить появление максимума озона на высотах около 15 км с помощью необычайно высоких коэффициентов обмена в стратосфере не кажутся убедительными, тем более что имеются наблюдения, показывающие быстрое увеличение озона в этом слое, никак не связанное с максимумом на высотах около 30 км, и, кроме того, в слое 15—

ния молекулы кислорода на два атома необходима энергия порядка 5 эв, что соответствует энергии кванта света с длиной волны порядка 2400 Å. Диссоциация молекул кислорода может происходить и при больших энергиях, при облучении воздуха рентгеновскими или гамма-лучами.

Можно указать по крайней мере два пути появления жесткого излучения на высотах около 15 км в атмосфере при вторжении в нее частиц космических лучей. При ядерных взаимодействиях вместе с заряженными пи-мезонами появляются и нейтральные пи-мезоны, которые тут же распадаются на гамма-кванты. Вторым источником жесткого излучения — ядра, захватившие медленный нейтрон. В результате такого захвата ядро атома приходит в возбужденное состояние и «успокаивается», лишь выбросив гамма-квант.

В настоящий момент, как уже отмечалось выше, затруднительно дать достаточно точный баланс энергии космических лучей. Особенно это относится к тем ударным зонам Штермера, в которых энергия, приносимая космическими лучами, должна быть повышена, а поток протонов анизотропен. Выяснение с помощью аппаратуры, установленной на поверхности Земли, особенностей энергетического спектра первичных частиц — мало надежный путь даже для вертикального потока частиц и пока совершенно негодный для частиц, идущих под углом к вертикали.

Многие вопросы, связанные с необычным поведением слоев нижней стратосферы, можно было бы достаточно просто решить, если бы мы располагали систематическими данными измерений, сделанными на высотах 15—18 км с самолета. На борту самолета желательно было бы иметь нейтронный монитор, телескоп космических лучей, способный измерять анизотропию, озонметр, счетчик тяжелых и легких ионов. Возможно, мощные циклоны имеют характерные особенности строения стратосферных слоев, своеобразные «корни» тропосферных образований. При этом весьма вероятно, что «корни» циклонов следует искать не в возмущениях температуры и тем более барички высоких слоев, а скорее в показателях электромагнитных или ядерных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер И. В. Нуклон-нуклонные и пион-нуклонные взаимодействия. 9-я международная конференция по физике высоких энергий. АН СССР, М., 1961.
2. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование Космоса. Изд-во АН СССР, М., 1963.
3. Крымский Г. Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей. Геомагнетизм и аэрномия, т. IV, № 6, 1964.
4. Неер Х. В., Андерсон Х. Р. Два необычных случая на больших высотах. Труды международной конференции по космическим лучам, т. III. Изд-во АН СССР, М., 1960.
5. Пуппи Дж. Энергетический баланс космического излучения. Физика космических лучей, т. III, ИЛМ., 1958.
6. Рубашев Б. М. Проблемы солнечной активности. Изд-во «Наука», М., 1964.
7. Саакян Г. С. Энергетические спектры и ядерные взаимодействия частиц космического излучения. Изд-во Ереванского ун-та, 1960.
8. Сазонов Б. И. Высотные барические образования и солнечная активность. Гидрометеиздат, 1964.
9. Стародубцев С. В. Прохождение заряженных частиц через вещество. Изд-во АН УзССР, Ташкент, 1962.
10. Сыроватский С. И. О спектре галактических и солнечных космических лучей. ЖЭТФ, т. 40, вып. 6, 1961.
11. Чаряхьян А. Н. и др. Случай больших возмущений интенсивности космических лучей в стратосфере. ЖЭТФ, т. 38, вып. 4, 1960.

12. Чарахчян А. Н. и др. Некоторые данные о космических лучах от Солнца. Геомagnetизм и аэрoнoмия, т. 1, № 2, 1961.
13. Экспериментальная ядерная физика, т. I, под ред. Э. Серге. ИЛ, М., 1955.
14. Dragt A. I. Effects of hydromagnetic waves on the lifetime of Van Allen radiation protons. I. Geoph. Res., 66, 1641, 1961.
15. Freden S. C. and White R. S. Particle fluxes in the inner radiation belt. I. Geoph. Res. 65, 1377, 1960.
16. Freier P. S. and Webber W. R. Exponential Rigidity Spectrums for Solar Flare Cosmic Rays. I. Geoph. Res., vol. 68, N 6, 1963.
17. Heckman H. H. and Armstrong A. H. Energy Spectrum of Geomagnetically Trapped Protons I. Geoph. Res., vol. 67, N 4, 1962.
18. Heckman H. H. and Nakano G. H. East-West Asymmetry in the Flux of Mirroring Geomagnetically Trapped Protons. I. Geoph. Res., vol. 68, N 8, 1963.
19. Lenchek A. M. and Singer S. F. Geomagnetically Trapped Protons from Cosmic-Ray Albedo Neutrons. I. Geoph. Res., Vol. 67, N 4, 1962.
20. Lenchek A. M. and Singer S. F. Effects of the finite Gyroradii of Geomagnetically Trapped Protons. I. Geoph. Res., vol 67, N 10, 1962.
21. Meeteer C. L., Godson W. L. The vertical distribution of atmospheric ozone over canadian stations Umkher observations. Quart. I. Roy. Met. Soc., vol. 86, N 370, 1960.
22. Mustel E. Quasi-stationary emission of gases from the Sun. Space Science Reviews, 3, 139—231, 1964.
23. Naugle I. E. and Kniffen D. A. The flux and energy spectra of the protons in the inner Van Allen Belt. Phys. Rev. Letters, 7, 3, 1961.
24. O'Brien B. I. High-Latitude Geophysical Studies with Satellite Injun 3. I. Geoph. Res., vol. 69, N 1, 1964.
25. Pizzella G., Mc Ilwain C. E. and Van Allen I. A. Time Variations of Intensity in the Earth's Radiation Zone October 1959 through December 1960. I. Geoph. Res., vol. 67, N 4, 1962.
26. Piddington I. H. Connexions between geomagnetic and auroral activity and trapped ions. Planet. Space. Sci. Vol. II, 451, 1963.
27. Pittcock A. B. Determinations of the Vertical Distribution of ozone by Twilight Ballons Photometry I. Geoph. Res., vol. 68, N 18, 1963.
28. Singer S. F. Cosmic Ray Time Variations Produced by Deceleration in Interplanetary Space. Nuovo Cimento, Suppl. 8, N 2, 1958.
29. Webber W. R. and Freier P. C. Electron Density Profiles in the Lower Ionosphere Due to Solar Cosmic Rays. I. Geoph. Res., vol. 68, N 23, 1963.
30. Webber W. R. Time variations of Low rigity cosmic rays during the recent sunspot cycle. Progress in elementary particle and cosmic ray physics., vol. VI, 1962.
31. Wentzel D. G. Hydromagnetic waves and the trapped radiation. I. Geoph. Res., vol. 66, 359, 363, 1961.

ВОЗМУЩЕННОСТЬ БАРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАК ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНДЕКС

При изучении связи Солнце — тропосфера для характеристики общей циркуляции часто используются различные индексы циркуляции. Однако многие из них, будучи созданы для каких-то определенных целей, не обладают теми качествами, которые необходимы для решения данного вопроса. В статье рассматривается индекс циркуляции, названный «возмущенностью», построение которого основано на тех же принципах, что и большинство геофизических индексов. Показано, что предлагаемый индекс позволяет выявить широтные особенности в общей циркуляции атмосферы, что имеет решающее значение для раскрытия механизма связи Солнце — тропосфера.

В последние десятилетия в синоптической метеорологии было предложено несколько десятков различных индексов, характеризующих напряженность атмосферной циркуляции. Одним из наиболее старых и хорошо себя зарекомендовавших является величина перепада давления между азорским максимумом и исландским минимумом. Около 25 лет назад интенсивность западного переноса, выраженная разностью давления между широтами 35 и 55° с. ш. была использована Россби как характеристика общей циркуляции атмосферы. Позднее А. Л. Кац в качестве индекса использовал поток массы воздуха через единицу вертикальной поверхности в единицу времени; им вычислялся отдельно индекс зональной и индекс меридиональной составляющих [4]. В индексах циркуляции Л. А. Вительса главной величиной оказалось отклонение давления от некоторой нормы, характерной для данного района в данный период, а также повторяемость дней с тем или иным значением давления.

Широкое распространение индексов циркуляции Каца и Вительса объясняется прежде всего простотой их физической интерпретации. Немаловажное значение имеет и правильный выбор начальных условий и соответственно начальной точки отсчета. Удачный выбор начальной точки отсчета, своеобразного нуля-пункта, определяет и физическую оправданность того или иного индекса и успешность его применения в оперативной и научной работе. Менее удачным по этой причине оказался индекс циркуляции Н. А. Белинского, который в качестве начального отсчета рекомендовал использовать наибольшее давление, когда-либо наблюдавшееся в циклонах, и наименьшее давление, когда-либо наблюдавшееся в антициклонах. С той же целью, для уточнения на-

чальной точки отсчета, ряд авторов использовал не просто скорость зонального переноса, а отношение этой величины к угловой скорости вращения Земли.

Названные выше индексы циркуляции, несмотря на их очевидные достоинства, несмотря на большое значение, которое они имеют для синоптической метеорологии, несмотря на их разнообразие, все же не могут с достаточной успешностью использоваться при исследовании связей Солнце—тропосфера. Связано это с целым рядом причин, наиболее существенные из которых мы назовем ниже.

Исследование связи Солнце—тропосфера на современном этапе не может быть достаточно успешным, если не будет хотя бы в первом приближении выяснен механизм передачи возмущения из космоса в плотные слои атмосферы, если не будет выяснена энергия частиц, вторгающихся сверху в атмосферу Земли. Сейчас не может быть сомнения в том, что возмущения вносят в атмосферу заряженные частицы, а не волновое излучение Солнца [5, 6]. Но этого убеждения еще не достаточно, чтобы выяснить механизм передачи возмущения. Поэтому чрезвычайно большое значение сейчас приобретают исследования широтных различий в общей циркуляции атмосферы. Существующие индексы циркуляции почти не улавливают широтных различий, не дают возможности выявить разницу в атмосферной циркуляции на двух близких широтах. Можно сказать, что «разрешающая способность» существующих индексов циркуляции чрезвычайно низка. Не умея выявить различия в циркуляции атмосферы на двух широтных кругах, разделенных 5—10 градусами, нельзя надеяться на то, что мы выявим особенности широтного хода, а по этим особенностям — энергию вторгающихся частиц и в конечном счете механизм передачи возмущения.

Проникновение заряженных частиц в атмосферу Земли жестко контролируется напряженностью геомагнитного поля Земли; проникающая способность частицы является функцией геомагнитной широты места. Учитывая относительную близость геомагнитных и географических широт, можно принять, что степень воздействия внешних факторов на атмосферную циркуляцию определяется географической широтой места.

Проведенные к настоящему моменту исследования связи Солнце—тропосфера [2, 5, 6] убедительно показывают, что наиболее «чувствительными» объектами к изменениям солнечной активности, а также к обстановке в околоземном космическом пространстве являются циклоны и антициклоны, напряженность же зонального потока на разных широтах, в разных долготных интервалах ведет себя по-разному и, по-видимому, прямо не связана с воздействием внешних факторов.

Напряженность зональной составляющей циркуляции атмосферы определяется прежде всего термическим контрастом полюс—экватор и имеет, как известно, четкий годовой ход с максимумом как раз в те месяцы, когда температурные различия между полярными и экваториальными областями Земли становятся наибольшими. При этом хорошо известно [1], что если бы отсутствовали возмущающие факторы, то этот зональный перенос мог бы наблюдаться как угодно долго, то усиливаясь зимой, то ослабевая летом. Стационарный зональный поток не вызывал бы никаких изменений (исключая годовой ход) в метеорологических элементах. При таком идеализированном движении вертикальные и агеострофические составляющие ветра отсутствовали бы, изотермы и изобары были бы параллельны широтным географическим кругам, каждая частица воздуха, обойдя Землю, возвращалась бы вновь в первоначальное положение.

Однако стационарный зональный поток фактически никогда не на-

блюдается благодаря множеству причин, способствующих его разрушению. Общеизвестно, что притоки тепла, связанные с температурными особенностями подстилающей поверхности, турбулентный обмен количеством движения между различными слоями, связанный с механическими особенностями подстилающей поверхности,— являются важными факторами, нарушающими зональную циркуляцию. Появление неоднородностей в плотности воздуха, появление вертикальных токов в конечном итоге возмущают идеальные условия, приводят к появлению циклонов и антициклонов, к усилению меридионального обмена, к выравниванию температурных различий полюс—экватор.

Однако, по нашему мнению, появление неоднородностей в плотности воздуха, появление вертикальных движений может быть связано не только с неоднородностями в подстилающей поверхности, но и с заряженными частицами, вторгающимися в атмосферу Земли. Внешние воздействия также вносят определенный вклад в разрушение стационарного зонального потока, способствуя усилению циклонов и антициклонов, а, возможно, и их возникновению.

Таким образом, индекс циркуляции, который желательно было бы иметь, должен отражать интенсивность меридионального обмена или, что то же самое, интенсивность цикло- и антициклогенеза вдоль широтных географических кругов. За начальную точку отсчета при этом естественно принять такое состояние общей циркуляции атмосферы, когда вдоль данной широты наблюдается стационарная зональная циркуляция, т. е. изотермы и изобары параллельны географическим широтным кругам. Чем сильнее циркуляция атмосферы отличается от этого состояния, чем большее число циклонов и антициклонов наблюдается вдоль данной широты, чем больше интенсивность этих образований, тем больше должно быть и численное значение индекса циркуляции, который желательно иметь для исследования связей Солнце—тропосфера.

Учитывая линейные размеры барических образований, нет необходимости подсчитывать индекс по кругам широты, расположенным ближе чем на 5 градусов. Однако выбор такого расстояния приводит к необходимости подсчитывать напряженность меридиональной составляющей циркуляции по 10—12 широтным кругам, что технически трудно осуществимо. Поэтому более целесообразно пойти по пути, использованному в свое время геофизиками, и определять численно лишь степень отклонения давления на выбранной широте от идеальных условий, в нашем случае — от условий стационарного зонального потока.

Магнитологи, исследователи космических лучей всякие нарушения и отклонения от нормальных (или спокойных) условий определяют как возмущения, вносимые какими-то факторами в идеальные, нормальные условия. Правда, их задача облегчалась тем, что нормальное состояние геомагнитного поля Земли, как и нормальный уровень космических лучей, наблюдалось большее число дней, чем отклонения от этого состояния. Определить это нормальное состояние не представляло трудности. Учитывая число отклонений в записи от нормального уровня, а также амплитуду этих отклонений, геофизики ввели в рассмотрение различные меры возмущенности [3, 8, 9], по существу еще не зная физических причин, их обусловивших. Например, первые геомагнитные индексы возмущенности появились около ста лет назад. И хотя представления о причинах нарушения нормального, спокойного состояния магнитного поля Земли сейчас коренным образом отличаются от тех, что существовали в прошлом веке, эти индексы не потеряли своего значения и теперь. Они с успехом используются наряду с новыми, уточненными и более чувствительными индексами.

Понятием возмущенности барического поля можно воспользоваться и в данном случае, когда поставлена задача оценить степень развития барических образований вдоль некоторой географической широты. Циклоны и антициклоны в данном случае можно рассматривать как выбросы — отклонения от нормального уровня, а их интенсивность — как амплитуду выбросов. Для простоты можно считать, что интенсивность барических образований пропорциональна числу замкнутых изобар или изогипс.

Легко показать, что при данной постановке вопроса возмущенность барического поля вдоль некоторой широты будет выражаться числом пересечений изогипсами (если речь идет о картах высотной барической топографии) этой широты. При стационарном зональном потоке индекс возмущенности B будет равен нулю, при появлении циклонов и антициклонов он будет увеличиваться тем больше, чем большее число циклонов и антициклонов появится на этой широте, чем больше будет их интенсивность. Можно написать

$$B = \sum_{i=1}^N (n_c + n_{ю}),$$

где N — число циклонов или антициклонов, n_c — число изолиний, пересекающих данную широту с севера на юг, $n_{ю}$ — число изолиний, пересекающих данную широту с юга на север. Если через n обозначить число замкнутых изогипс, то

$$n = \frac{n_c + n_{ю}}{2}.$$

Если допустить, что все циклоны или антициклоны на данной широте имеют равную интенсивность, то индекс возмущенности B будет выражаться произведением числа барических образований на их интенсивность с коэффициентом 2:

$$B = 2Nn.$$

Следует отметить, что аналогичный индекс как меру количества воздуха, переносимого в единицу времени через фиксированную широту, ранее предложил А. Л. Кац. Таким образом, меридиональный индекс, в отличие от индекса зонального, может служить и мерой возмущенности циркуляции атмосферы, мерой отклонения ее состояния от нормальных условий.

Однако в летний период слабая возмущенность барического поля в умеренных и низких широтах приводит к появлению большого числа циклонов и антициклонов, очерченных всего лишь одной замкнутой изогипсой. Вклад этих образований в B оказывается значительным, хотя общая картина возмущенности бывает весьма вялой. Принимая во внимание, что проведение замкнутой изогипсы при такой ситуации часто зависит от подхода синоптика, расчерчивающего карту, было решено, как это и делается во многих синоптических исследованиях, не принимать во внимание такие барические образования. Индекс возмущенности барического поля на фиксированной широте вычислялся, таким образом, по формуле

$$B = \sum_{i=1}^N [(n_c - 1) + (n_{ю} - 1)].$$

Удобство этого индекса заключается в том, что практически не нужно определять число возмущений (циклонов, антициклонов, гребней и ложбин) на данной широте, а также их интенсивность, что, кстати

сказать, не всегда просто сделать, учитывая, что большинство барических образований лишь касаются ее. Индекс возмущенности, подсчитываемый по последней формуле, численно равен числу смен номера изогипс, произошедших на фиксированной широте. Эту величину не трудно подсчитать, двигаясь вдоль широтного круга, обходя его по всей длине.

Поскольку длины широтных кругов не равны и увеличиваются от полюсов к экватору, поскольку на некоторых участках могут отсутствовать синоптические данные и подсчет индекса возмущенности окажется возможным лишь на ограниченном участке широтного круга, то все данные, полученные с разных широт, с разных по длине отрезков, необходимо приводить к единой длине, которая выбрана за эталон. Такую операцию не трудно провести введением соответствующих коэффициентов. Полученные таким образом данные с различных широт окажутся сравнимыми и приспособленными для выявления широтных особенностей общей циркуляции атмосферы.

Итак, предложенный индекс возмущенности барического поля, сходный по своему построению с большинством геофизических индексов, обладает необходимыми свойствами для изучения связей Солнце—тропосфера: он позволяет измерять напряженность меридиональной циркуляции на целой серии географических широтных кругов. Индекс равен нулю при стационарном зональном потоке и возрастает тем сильнее, чем больше вклад факторов, возмущающих этот поток. Индекс по своей сути является планетарным индексом, точнее серией планетарных индексов, из которых при желании может быть вычислен средний индекс для каждого дня. Применение этого индекса в некотором небольшом районе едва ли целесообразно, поскольку длина широтных отрезков окажется сравнимой с линейными размерами возмущений, циклонов и антициклонов.

При построении индекса не использовались никакие допущения, которые могли бы преувеличить значение одних возмущающих факторов и недооценить значение других. Допущение о том, что нормальным, спокойным состоянием циркуляции атмосферы является стационарный зональный поток, кажется в высшей степени вероятным; по этому вопросу среди метеорологов нет разногласий. Исследования в планетной астрономии и особенно изучение циркуляции атмосфер других планет подтверждает справедливость этой точки зрения.

В заключение для иллюстрации особых достоинств индекса возмущенности барического поля нам хотелось бы остановиться на некоторых предварительных результатах, полученных с его помощью.

На рис. 1 приводятся кривые широтного хода индекса возмущенности барического поля северного полушария Земли. По горизонтали отложена широта, по вертикали — индексы возмущенности. За эталон принята длина параллели 40° , к которой приведены значения индекса на других широтах. На рисунке приведены среднемесячные значения индексов для четырех месяцев. 1959 г. — год высокой солнечной активности, 1962 г. — год начала спада активности в 11-летнем цикле.

Не углубляясь сейчас в детали рассматриваемого широтного хода возмущенности барического поля, что мы предполагаем сделать в ближайших работах, отметим здесь лишь следующее: 1) спад возмущенности барического поля происходит во всех случаях медленно в тропических широтах и быстро при движении от умеренных широт к тропическим; 2) возмущенность барического поля севернее 55 -й параллели не увеличивается: либо остается на том же уровне, либо даже уменьшается к полюсу; 3) спад возмущенности от умеренных широт к тропи-

ческим происходит строго пропорционально широте. Все приведенные факты говорят о том, что здесь мы имеем дело с так называемым эффектом «широтного колена» в уровне космических лучей [3]. Особое значение здесь имеет тот факт, что перелом в широтном ходе происходит именно на широте $52-53^\circ$, являющейся своеобразным репером

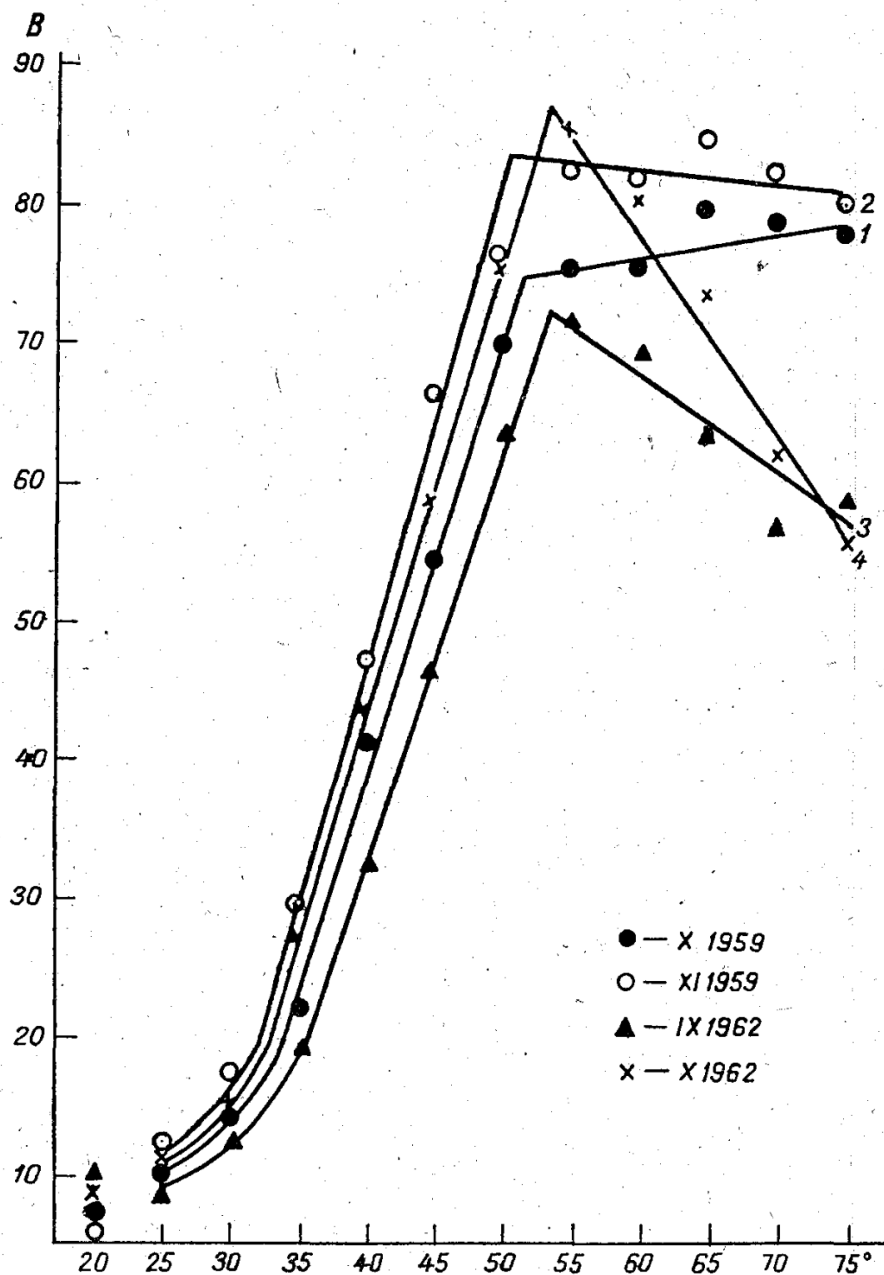


Рис. 1. Широтный ход среднемесячных индексов возмущенности барического поля для случайно выбранных месяцев 1959 и 1962 гг.

в определении этого эффекта. Севернее этой широты интенсивность космических лучей перестает расти [3]. Как видим, основная задача, которую необходимо сейчас решить, — выявление широтных особенностей — разрешается с помощью возмущенности барического поля — индекса, четко улавливающего широтные различия в общей циркуляции атмосферы. Особо следует подчеркнуть, что если бы не было сделано приведение индекса к единой длине, то не было бы и такой четкости

в широтном ходе: линейного спада интенсивности и четкого перелома в районе широт $52-53^\circ$; мы имели бы параболу с вершиной в умеренных широтах и двумя минимумами — у экватора и у полюса.

В качестве предварительного результата можно сказать, что на тропосферную циркуляцию, по-видимому, оказывают влияние частицы большой энергии, во всяком случае большей, чем мы до сих пор предполагали. В этой связи высказанные в предыдущей статье [7] соображения о роли космических лучей, накопленных в движущихся от Солнца корпускулярных потоках, для тропосферной циркуляции не кажутся необоснованными. Более четкие доказательства тому мы намерены привести в последующих работах.

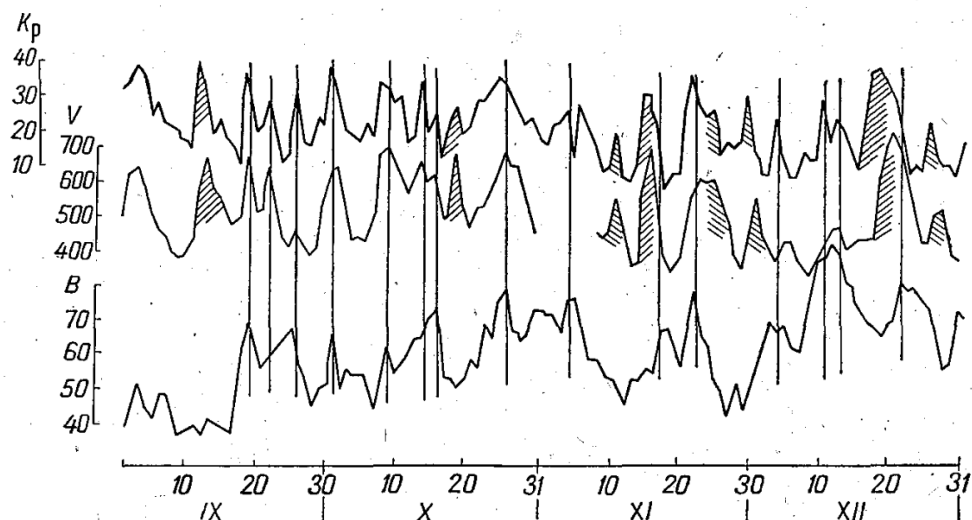


Рис. 2. Сравнение хода геомагнитной активности (K_p), скорости корпускулярного потока, измеренной «Маринер-2» (V) и возмущенности барического поля в средней тропосфере (B) за последние 120 дней 1962 г.

Небезынтересно отметить, что подтверждение высказанным соображениям о роли накопленных космических частиц можно усмотреть и в сопоставлении геомагнитной возмущенности с возмущенностью барического поля атмосферы. Как было указано в [7], не все геомагнитные возмущения должны приводить к возмущениям в атмосферной циркуляции, а лишь те из них, которые накопили достаточное количество частиц космических лучей, двигаясь от Солнца к Земле.

На рис. 2 приведены: ход планетарного индекса геомагнитной возмущенности — K_p (верхняя кривая), скорость движения солнечного корпускулярного потока в околоземном пространстве (км/сек.), измеренная космическим кораблем «Маринер-2» [10] (средняя кривая), и, наконец, планетарный индекс возмущенности барического поля Земли (нижняя кривая), вычисленный для группы широт $30-55^\circ$ с. ш. Данные приведены за четыре последних месяца 1962 г.

Обращает на себя внимание тот факт, что между нижней кривой возмущенности барического поля и верхними кривыми нет детального совпадения, но часть пиков в кривой возмущенности определенно совпадает с приходом к Земле корпускулярных потоков. Эти потоки принесли с собой частицы космических лучей и оказались эффективными, другие же корпускулярные потоки (выделенные на рис. 2 штриховкой) оказались неэффективными и прошли мимо, не внося никаких возмущений в барическое поле.

Следует отметить, что индекс возмущенности, приведенный на рис. 2, получен благодаря осреднению данных, снятых с шести географических

широтных кругов. Можно думать, что роль постоянно действующих факторов, возмущающих стационарный зональный поток, связанных с особенностями подстилающей поверхности, здесь сведена к минимуму и все выбросы в возмущенности барического поля связаны с внешними космическими факторами. Это тем более справедливо, что отдельные выбросы очень кратковременны и к тому же связаны в некоторые последовательности, что исключает возможность интерпретации их как случайных выбросов. Последнее обстоятельство хорошо можно проиллюстрировать рис. 3.

На рис. 3 приведены сглаженные кривые хода геомагнитного индекса K_p и индекса возмущенности барического за зиму 1959-1960 г.

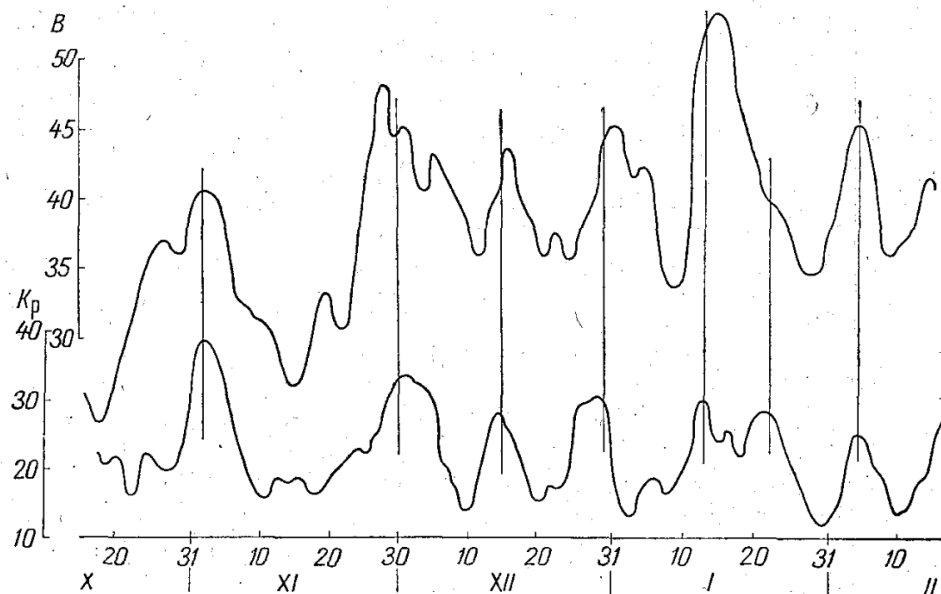


Рис. 3. Ход сглаженных по скользящим пятидневкам индексов геомагнитной активности (K_p) и индексов возмущенности барического поля (B) за зиму 1959—1960 г.

Данные были сглажены методом скользящих пятидневок, причем данные по индексу возмущенности барического поля на H_{500} снимались лишь по четырем широтным кругам 30, 35, 40 и 45° с. ш. При рассмотрении ежедневных данных, так же как и на рис. 2, не все корпускулярные потоки приносили возмущения в барическое поле Земли. Но при сглаживании роль отдельных корпускулярных потоков была занижена, но зато более очевидна стала роль последовательностей, в которые группируются своеобразные «пучки» корпускулярных потоков. Из рассмотрения рис. 3 видно, что за зиму 1959-1960 г. существовало по крайней мере шесть последовательностей, в которые можно объединить все корпускулярные потоки. Этим усилениям корпускулярного излучения Солнца соответствуют периоды большей запятненности Солнца. Однако следует в то же время отметить, что рассмотренный период хотя и был близок к максимуму 11-летнего цикла солнечной активности, но не отличался особенно большой возмущенностью: в этот период почти не наблюдалось больших хромосферных вспышек, радиоизлучения Солнца на метровом диапазоне и больших магнитных бурь. Этот период скорее напоминал годы, предшествующие минимуму солнечной активности, когда связи между магнитными бурями и тропосферной циркуляцией прослеживаются особенно четко [5].

Последнее замечание должно предупредить попытки находить связь

между особенно большими возмущениями на Солнце и возмущениями в тропосфере. Такой связи как раз может и не быть по той причине, что плотные корпускулярные потоки «выметут» из околоземного пространства частицы космических лучей и Земля хотя и будет проходить через «пучки» корпускулярных потоков, но никаких возмущений в тропосфере наблюдаться не будет.

Приведенные на рисунках 2 и 3 материалы показывают большие перспективы, которые открываются для исследования связей Солнце—тропосфера с введением индекса возмущенности барического поля, который способен выявить не только широтные эффекты, но и позволяет успешно изучать и временные особенности в ходе общей циркуляции атмосферы. Можно полагать, что индекс возмущенности барического поля способен даже выявлять различия между двумя барическими картами, построенными с интервалом в 6 или 12 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гандин Л. С., Лайхтман Д. Л., Матвеев Л. Т., Юдин М. И. Основы динамической метеорологии. Гидрометеоиздат, Л., 1955.
2. Гирс А. А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
3. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование Космоса. Изд-во АН СССР, М., 1963.
4. Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
5. Рубашев Б. М. Проблемы солнечной активности. Изд-во «Наука», 1964.
6. Сазонов Б. И. Высотные барические образования и солнечная активность. Гидрометеоиздат, Л., 1964.
7. Сазонов Б. И. О возможной роли космических лучей в солнечно-тропосферных связях. См. настоящий сборник.
8. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Изд-во ЛГУ, 1964.
9. Kodama M. and Wada M. On cosmic ray I—index—as a trial to represent degree of disturbance in time variations. Rept. Ionosph. Space Research Japan, vol. XVIII, N 2, 1963.
10. Snyder C. W. and Neugebauer M. The Solar Wind Velocity and Its Correlation with Cosmic-Ray Variations and with Solar Geomagnetic Activity. I. Geoph. Res., vol. 68, N 24, 1963.

06
T78
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
ИМ. А. И. ВОЕЙКОВА

ТРУДЫ

ВЫПУСК 198

519.4615
ВОПРОСЫ
ОБЩЕЙ И СИНОПТИЧЕСКОЙ
КЛИМАТОЛОГИИ

Под редакцией
д-ра географ. наук О. А. ДРОЗДОВА
и канд. географ. наук Е. В. ВОРОБЬЕВОЙ

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1966