

## Космос — источник прогностической информации

Современное естествознание в значительной своей части построено и развивается на осмысливании земных фактов. Человеческая мысль склонна скорее земные законы распространить на Вселенную, нежели в земном и обыденном увидеть проявление неких всеобщих законов Космоса. Не случайно Фридрих Энгельс писал в «Анти-Дюринге»: «Вся наша официальная физика, химия и биология исключительно геоцентричны, рассчитаны только для Земли»<sup>1</sup>.

Да и сейчас, в век Космоса, все еще продолжается процесс ломки геоцентрических концепций. Даже метеорология — младшая сестра астрономии и физики — по существу пока остается «земной наукой». Что касается долгосрочных прогнозов в этой области, то, по мнению академика М. В. Келдыша, «все сделанное до сих пор должно быть подвергнуто фундаментальному пересмотру. Почему? Потому что весь теоретический аппарат, применяемый для расчетов долгосрочных прогнозов, до последнего времени строился на основе закономерностей тех гидродинамических процессов, которые протекают замкнуто в атмосфере. Между тем разогрев верхних слоев атмосферы, постоянно сказывающийся на процессах в нижних слоях, в значительной степени зависит от воздействий Солнца, которых мы раньше не знали и которые нам стали известны благодаря исследованиям на спутниках и других космических аппаратах. Поэтому прогресс в области долгосрочных прогнозов, видимо, следует ожидать с созданием, если так можно сказать, космической теории погоды» [97].

То же самое относится и к таким наукам, как климатология, гидрология и гляциология, сейсмология и аэрономия, биология, ветеринария и медицина, занимающи-

---

<sup>1</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 20, стр. 553.

мися изучением закономерностей многолетних колебаний природных и биологических процессов. Однако при изучении этих колебаний преобладает узкоспециализированный подход. Между тем нет только проблемы многолетних колебаний речного стока, урожаев, эпидемической заболеваемости, а есть единая проблема многолетних колебаний природных процессов, естественно, с разделами о речном стоке, урожайности, эпидемиях и др. И только широкий комплексный подход в ее изучении будет по-настоящему эффективным.

Главным для разработки методики долгосрочных прогнозов является поиск информации о многолетних колебаниях природных процессов на Земле.

Задача поиска информации и ее обработки грубо может быть разделена на следующие части:

1. Выявление источников информации о конкретном процессе. Применительно к речному стоку, например, наибольшее значение имеют прошлые гидрометрические наблюдения, а также данные, характеризующие влияние постоянно действующих или иных факторов, изменчивость которых более или менее успешно прогнозируется (или может прогнозироваться) на достаточно длительный отрезок времени (циркуляция атмосферы, солнечная активность, космические лучи, приливообразующие силы, тенденции наступания или отступления ледников, хозяйственная деятельность человека). Но до сих пор остается неясным, какую информацию можно взять из рядов прошлых наблюдений о речном стоке; как и в каких пределах она может быть использована для экстраполяции процесса на будущее.

2. Установление связей или определение форм, видов и других показателей информации, которую могут дать источники. Эта часть проблемы является очень важной, и ей должно быть уделено значительное внимание, так как в ряде случаев связи между рассматриваемыми явлениями и процессами оказываются чрезвычайно сложными и изменчивыми. Среди них имеются однозначные и многозначные, линейные и нелинейные, изменяющиеся и не изменяющиеся во времени, фоновые и точечные и др. Изучение этих свойств ведется с давних пор, но многие из них еще не только не изучены, но, возможно, даже не открыты в силу ограниченности методов, позволяющих выявить связь.

3. Переработка и использование всего или необхо-

димого количества информации для предвидения хода конкретного процесса. Многообразие и изменчивость связей рассматриваемых процессов, неясность их физической природы делают эту часть проблемы очень сложной и трудной. Как показывает опыт последних лет, наиболее перспективными можно считать такие методы переработки и использования информации, которые позволяли бы учитывать большое количество информации любого вида. Естественно, они должны базироваться (в силу сложности самой задачи) на применении математических методов и вычислительной техники. Одним из конкретных предложений может быть использование некоторых информационных обучающихся систем, обладающих большими потенциальными возможностями, в том числе при решении прогностических задач.

Энергия всех природных процессов на Земле черпается из микро- и макрокосмоса, поэтому целесообразно прежде всего познакомиться с теми космическими условиями, которые играют важную роль в динамике этих процессов и могут служить для них источником прогностической информации.

### **Основные компоненты космического пространства**

Основными объектами, из которых состоит Космос, еще совсем недавно считались звезды, которые группируются в галактики, межзвездный и межгалактический газ и, наконец, твердые холодные тела — планеты. Сейчас положение существенно изменилось в том плане, что главными, решающими объектами, определяющими динамику и эволюцию Вселенной, стали рассматриваться магнитные поля и частицы высоких энергий, заполняющие Космос, и связанное с их взаимодействием радиоизлучение. Вопрос не только в том, что радиоизлучение сравнительно недавно вошло в астрономическую науку и привлекло особое внимание исследователей; вопрос заключается в том, что магнитные поля и космические лучи отражают наиболее фундаментальные процессы, которые происходят в космическом пространстве и, если говорить упрощенно, несут наибольшую информацию о прошлом, настоящем и будущем Космоса.

В результате многочисленных исследований послед-

них лет, благодаря бурному развитию астрономии, физики космического пространства, астрофизики космических лучей стало ясно, что ускорение частиц является одним из наиболее характерных свойств космической плазмы. Генерация и поглощение частиц высоких энергий — это универсальный космический феномен [68]. Ускорительные процессы, в которых очень малой группе заряженных частиц передается энергия от частиц низкоэнергичных, идут в магнитосфере Земли и Юпитера, в атмосфере Солнца, в оболочках различного типа взрывающихся звезд и пульсаров, в межзвездном пространстве и в центре Галактики, в различного типа квазизвездных объектах и радиогалактиках. При этом частицы ускоряются от тепловых энергий до десятков электрон-вольт в магнитном поле Земли, до миллиардов электрон-вольт — в оболочках звезд типа Солнца и до энергий  $10^{20}$  электрон-вольт (эв) — в оболочках нейтронных звезд, в галактиках и Метагалактике. Ускорение некоторой доли тепловых частиц до высоких энергий — это основной механизм энергетического возбуждения космической плазмы, которая возникает в результате взрывов, конвекции, столкновения потоков, обтекания и т. п.

Космическая плазма, как правило, охвачена крупными макроскопическими движениями, которые порождают в ней токи и электромагнитные поля, приводящие в конечном итоге к ускорению частиц. Кинетическая энергия космической плазмы идет на генерацию и усиление магнитных полей космического пространства вплоть до некоторого равновесного состояния, когда обе эти энергии (кинетическая энергия и магнитная энергия) становятся равными, т. е.

$$\frac{H^2}{8\pi} = \frac{\rho u^2}{2},$$

где:  $H$  — напряженность магнитного поля;

$\rho$  и  $u$  — плотность и скорость заряженных частиц.

Явление ускорения частиц в космическом пространстве находится на первый взгляд в резком противоречии со вторым началом термодинамики. Действительно, благодаря ускорительным процессам космическая плазма переходит, казалось бы, в явно неравновесное состояние. Энергия передается частицами высокой энергии, будучи отобрана от частиц низкоэнергичных. Однако в том, что такие процессы протекают в Космосе, нет никакого

противоречия с законами термодинамики. Как показал С. И. Сыроватский [178], статистически более выгодным оказывается распределение частиц с вытянутым в область высоких энергий «хвостом». Ускорительный процесс переводит космическую плазму в статистически более вероятное, более устойчивое состояние. В космической плазме благодаря наличию магнитных полей заряженная частица взаимодействует сразу с большой совокупностью частиц плазмы, а не с одной из них, как это имеет место в нейтральном газе.

Газ в космическом пространстве почти полностью ионизирован. Электроны, протоны, альфа-частицы и другие, более тяжелые ядра и ионы существуют, находясь в постоянном вращательном движении вокруг силовых линий магнитного поля. Перемещение газа происходит неразрывно с перемещением магнитного поля, т. е. с большой точностью выполняется условие «вмороженности» космического магнитного поля в космический газ. Электроны высоких энергий, вращаясь в магнитных полях, излучают радиоволны и дают информацию о многих важных процессах, происходящих в Космосе, получить которую иным путем было бы невозможно. Радиометодами исследуются энергетика и динамика таких космических процессов, как взрывы и разлет оболочек сверхновых звезд, движение газа в момент хромосферных вспышек на Солнце, движение облаков газа в Галактике и т. п. В нашей звездной системе — Галактике плотность энергии космических лучей составляет величину порядка  $5 \cdot 10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup>. Напряженность же магнитного поля в Галактике составляет величину порядка  $5 \cdot 10^{-6}$  эрстеда, что в пересчете по приведенной выше формуле дает плотность энергии магнитного поля примерно в  $5 \cdot 10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup>. Хорошее согласие этих оценок дает основание утверждать, что они близки к реальным величинам. Если теперь подсчитать плотность энергии теплового движения  $Q$  межгалактического газа (которому еще недавно отводилась решающая роль в динамике Космоса) по формуле:

$$\frac{3}{2} nKT = Q,$$

где  $n$  — концентрация частиц;

$T$  — температура газа;

$K$  — постоянная Больцмана,

то, подставляя разумные оценки, можно получить, что плотность энергии межзвездного газа, как правило, дол-

жна быть ниже, чем плотность энергии космических лучей и магнитных полей. Отсюда следует важный вывод о том, что строение галактик, распределение холодного газа в них контролируется космическими лучами, которые «выметают» газ из одних областей и «откладывают» его в другие области.

Общая энергия космических лучей в Галактике составляет  $10^{56}$  эргов, а время жизни не превышает  $10^9$  лет. Отсюда следует, что имеется поток энергии порядка  $10^{40}$  эрг/сек<sup>-1</sup>, обеспечивающий генерацию новых частиц. Полагают, что звезды типа Солнца не в состоянии выделять более  $10^{24}$  эрг/сек<sup>-1</sup> на космические лучи. Все звезды в Галактике такого типа (их общее число — около  $10^{12}$ ) выделяют не более  $10^{36}$  эрг/сек<sup>-1</sup>. Основными поставщиками космических лучей являются, по-видимому, взрывы сверхновых и взрывы в ядре Галактики, которые происходят через несколько десятков миллионов лет, как полагает В. Л. Гинзбург [56]. Сверхновые взрываются в Галактике примерно раз в 30 лет, при этом, если сверхновая взрывается в той же части Галактики, где расположена солнечная система, с Земли наблюдается яркая вспышка, которая может оказаться ярче всех звезд, вместе взятых. При взрыве звезда сбрасывает газовую оболочку, которая по массе может в несколько раз превышать массу Солнца. Расширяясь, оболочка теряет яркость и превращается в туманность.

подавляющее число заряженных высокоэнергичных частиц, которые можно зарегистрировать у Земли, образуется в пределах нашей Галактики. На 1 кв. см в одну секунду приходит примерно одна высокоэнергичная частица в околоземном пространстве. Их несколько больше вне поля действия солнечных магнитных полей, которые выносятся солнечной короной за пределы орбиты Сатурна. Их значительно больше в недрах нашей Галактики или в так называемых радиогалактиках, откуда к Земле приходят, хотя и очень редко, частицы с гигантскими энергиями вплоть до  $10^{20}$  эв. Основная масса приходящих к Земле частиц имеет энергию  $10^8$ — $10^{10}$  эв, в которых содержится основная энергия, приносимая к Земле космическими лучами. Частицы меньших энергий с трудом преодолевают галактические магнитные поля, имеют в сотни раз меньшие скорости движения, чем частицы релятивистские, и потому поток их около Земли значительно ослаблен. Протоны с энергией

$10^9$  эв и меньше в периоды хромосферных вспышек генерируются на поверхности Солнца, и потому поток этих частиц у Земли в значительной мере контролируется процессами, происходящими на Солнце.

По свойствам магнитных полей и космических лучей космическое пространство можно разделить на межгалактический, галактический, межпланетный и околоземной Космос. Только частицы с очень высокими энергиями преодолевают магнитное поле Галактики и вырываются в межгалактическое пространство. На первый взгляд кажется, что напряженность галактического поля очень мала — всего  $10^{-6}$  эрстедов в сравнении с земным магнитным полем (0,5 эрстеда). Однако слабость межзвездных полей компенсируется их огромной протяженностью в десятки световых лет, так что общее воздействие на космические лучи оказывается весьма значительным. Радиус винтовой траектории, по которой движется заряженная частица вокруг силовых линий магнитного поля, можно оценить по формуле

$$R = E/300 H,$$

где  $H$  — напряженность поля в эрстедах,

а  $E$  — энергия протона в электрон-вольтах.

Оценки показывают, что радиус винтовой траектории  $R$  оказывается в галактическом пространстве на несколько порядков меньше характерных линейных масштабов галактического магнитного поля. В межпланетном Космосе типичное значение напряженности магнитного поля равно  $10^{-5}$  эрстедам, энергия протона —  $10^{10}$  эв, откуда величина радиуса оказывается равной  $10^{13}$  см. Это расстояние сравнимо с расстоянием от Солнца до Земли и может считаться характерным линейным масштабом в межпланетном Космосе. Отсюда можно сделать вывод, что для протонов с энергией меньше  $10^{10}$  эв (которые несут основную долю энергии космических лучей) межпланетные магнитные поля являются существенным контролирующим фактором. По мере уменьшения энергии частиц роль магнитных полей возрастает.

Околоземным Космосом обычно называют ту область межпланетного пространства, которая находится под контролем земного магнитного поля. Она простирается на расстояние 8—10 земных градусов. Эта область характеризуется довольно сильными магнитными полями, в которых протоны с энергией  $10^8$  эв и меньше могут

«запутываться», поскольку радиус винтовой траектории этих частиц значительно меньше линейных размеров самого поля. В результате магнитное поле Земли можно рассматривать как аккумулятор или ловушку заряженных частиц. Строение земного магнитного поля таково, что оно при благоприятных условиях может играть роль и своеобразной магнитной призмы, уплотняющей потоки заряженных частиц.

Потоки протонов высокой энергии в межпланетных и галактических полях изотропны, частицы достаточно «перемешаны», хотя определенная анизотропия частиц существует там, где энергия магнитных полей достаточно велика. В слабых магнитных полях анизотропный поток высокоэнергичных частиц вызывает появление магнитодинамических волн, которые способствуют изотропизации потока [72].

Почему же в последнее десятилетие протоны высокой энергии привлекли к себе столь пристальное внимание многих ученых — от астрофизиков до микробиологов? Ответ заключается в том, что космические лучи для Земли — планеты, обладающей значительным магнитным полем, — могут играть совершенно уникальную роль. Магнитное поле Земли — это природный усилитель притока энергии, вносимой космическими лучами. Важность этого усилителя становится очевидной, если учесть, что в прошлом Земля подвергалась неоднократному облучению интенсивным потоком космических лучей. Об этом свидетельствуют данные по радиоуглероду ( $C^{14}$ ), извлеченному из образцов старых деревьев, данные по бериллию ( $Be^{10}$ ) из донных отложений, наконец, данные по тритию ( $H^3$ ) из гренландского льда [120]. Вместе с закономерным убыванием трития с глубиной в леднике обнаружены слои с неожиданно высоким содержанием трития. Выяснено, что эти слои связаны с очень низким уровнем солнечной активности. По-видимому, ослабление межпланетных магнитных полей повышало интенсивность космических лучей у Земли и это увеличивало в 2 раза образование количества трития в атмосфере.

Космические лучи — свидетели каких-то бурных процессов, некогда происходивших в глубинах Космоса, — вызывают не менее бурные процессы на Земле. Космические лучи или вторичные частицы, образовавшиеся от взаимодействия их с веществом атмосферы, проникают



повсюду. Только глубокие недра планеты скрыты от их влияния. Способность нейтронов и протонов проникать в интимные процессы, происходящие на молекулярном уровне, уникальна, и не случайно эволюцию живой материи, ее появление, старение, мутагенные процессы сейчас увязывают с космическими лучами. Несомненно, есть некая предопределенность течения всех земных процессов некоторым уровнем облучения Земли частицами высоких энергий, заполняющих Галактику.

Несмотря на малость потока энергии, вносимого космическими лучами в атмосферу, эта энергия может быть почти целиком использована на перестройку характера атмосферной циркуляции. Все лучистые притоки тепла к атмосфере Земли должны хотя бы частично поглотиться, затем их энергия должна произвести работу расширения газа и перестройку барического поля, прежде чем некоторая доля пришедшей энергии пойдет на создание потоков воздуха, на создание новой циркуляции в атмосфере Земли. Космические лучи-протоны высокой энергии и альфа-частицы обладают в этом отношении совершенно уникальными свойствами: они способны, минуя малоэффективный механизм тепловой машины, рассеивать свою кинетическую энергию в том газе, в котором они поглощаются. Благодаря упругим и квазиупругим соударениям, которые преобладают при прохождении протонов с энергией  $10^9$  эв через газ атмосферы, в слое поглощения этих частиц, который расположен на высотах 8—12 км, может быть наведен слабый ветер. Этот ветер, не связанный со строением высотных барических полей, можно рассматривать как агеострофический ветер. По современным представлениям, именно с этой составляющей связывают генерацию кинетической энергии в атмосфере, перестройку одного типа циркуляции в другой тип. Ниже мы будем более подробно говорить об этом, сейчас же отметим лишь три следующих обстоятельства, которые позволяют с особым вниманием подходить к учету роли космических лучей в изменении характера и интенсификации общей циркуляции атмосферы:

а) Магнитное поле Земли. Оно способно обеспечить значительное усиление тех вариаций потоков высокоэнергичных частиц, которые наблюдаются в межпланетном пространстве. Благодаря этому в отдельные районы атмосферы может вноситься энергия, значительно пре-

восходящая ту, что наблюдается вне магнитосферы Земли. В последние годы поток протонов, выходящий из магнитосферы в атмосферу Земли, принято даже называть «избыточным» излучением.

б) Особый высокоэффективный механизм передачи кинетической энергии от протонов к частицам воздуха через упругие и квазиупругие соударения. Этот механизм в тысячи раз более эффективен для изменения атмосферной циркуляции, чем механизм тепловой машины, через который неизбежно проходят все лучистые потоки тепла, приходящие к атмосфере Земли. Именно поэтому нельзя к энергии, вносимой в атмосферу Земли космическими лучами, подходить с теми же мерками, с которыми подходят к разным притокам лучистой энергии, достигающим атмосферы.

в) Громадные запасы потенциальной энергии в атмосфере Земли, перевод которой в кинетическую энергию стимулируется появлением агеострофических составляющих ветра. Эти составляющие могут быть связаны и с облучением атмосферы протонами высоких энергий. Энергетически космическими лучами не объяснить даже тысячной доли кинетической энергии общей циркуляции, и можно считать справедливым утверждение, что атмосферный ветер — это преобразованная лучистая энергия Солнца. Однако процесс преобразования потенциальной энергии в кинетическую идет, по-видимому, в определенной мере под контролем космических лучей — стимуляторов преобразования одного вида энергии в другой.

### **Прогнозы солнечной активности — прогнозы земных явлений**

Основные характеристики межпланетного космического пространства определяются главным образом процессами, происходящими на поверхности Солнца, и прежде всего скоростью и плотностью ионизованных частиц солнечного ветра, их широтным и долготным распределением, а также напряженностью и направлением магнитного поля, увлекаемого этими потоками в межпланетное пространство. Физические процессы, протекающие в околоземном космическом пространстве, в свою очередь

зависят от той обстановки, которая складывается в межпланетном Космосе. Таким образом, обстановка в космическом пространстве, определяющая режим облучения Земли космическими лучами — протонами высоких энергий, зависит в значительной степени от процессов, протекающих на Солнце. Этим и объясняются многочисленные факты, подтверждающие связь процессов на Солнце с процессами, протекающими на Земле.

Для успешного предсказания земных процессов необходимо знание процессов космических, процессов, протекающих на Солнце в любой интересующий прогнозиста момент. Безусловно, и земная информация может оказаться весьма полезной для составления прогноза земного явления, но не стоит слишком переоценивать ее полезность. Земные процессы не обладают значительной памятью в силу того, что всякое возмущение в земных условиях очень быстро рассеивается. В условиях Земли, где процессы протекают при высоком молекулярном и турбулентном трении, не может быть естественных долговременных носителей информации. Наоборот, в космической плазме, в плазме Солнца магнитные поля могут существовать очень долго, и их особенности могут прослеживаться десятилетиями [176]. Например, две активные долготы на Солнце, в которых в основном наблюдаются хромосферные вспышки, существуют около 25 лет, а 11-летняя цикличность солнечной активности устойчиво прослеживается более 300 млн. лет. Не стоит говорить о том, что в разреженной космической среде такие твердые тела, как планеты, могут существовать миллиарды лет. Это обстоятельство следует иметь в виду, поскольку многочисленные связи, найденные статистически между предыдущими и последующими земными процессами и используемые для долгосрочного прогнозирования, в действительности могут оказаться опосредованными связями между предыдущими и последующими космическими процессами.

Устанавливая связь некоторого земного процесса с процессами, протекающими в Космосе, мы уже тем самым признаем возможность использования космических носителей памяти для долгосрочного прогнозирования этого земного процесса. И если даже земной процесс обладает весьма ограниченной памятью (например, тропический циклон, гроза), то это еще не значит, что из него нельзя извлечь полезную информацию для прогно-

зирования будущих процессов в атмосфере Земли. Определенные космические условия, стимулировавшие развитие тайфуна или тропического циклона, закономерно будут развиваться, сохраняться или заменяться новыми условиями в Космосе. Даже спустя десятки дней после исчезновения циклона в атмосфере Земли сам факт его появления будет служить важным временным репером для происходящих в космическом пространстве изменений.

К настоящему моменту определенные успехи достигнуты в прогнозировании 11-летних циклов солнечной активности [49]. Имеются десятки методик прогнозирования дат максимумов и минимумов солнечной активности на один-два цикла вперед, уровня запятненности Солнца в эти периоды. Имеющаяся литература исчерпывающе освещает этот вопрос [49, 161]. Следует лишь заметить, что до сих пор не существует теории солнечной активности, неясна форма превращения внутренней энергии Солнца в энергию солнечной активности. Все предложенные до сих пор теории солнечной активности не дают удовлетворительного объяснения самого главного феномена — цикличности солнечной активности. По-видимому, и это сейчас признается большинством ученых, решение вопроса об активности Солнца лежит на каком-то сочетании эндогенных и экзогенных факторов, определяющих перевод ядерной энергии в энергию нетепловых излучений Солнца (корпускулярное, рентгеновское, радиоизлучение). Считается, что за пятнообразовательный процесс на Солнце ответственны циркуляция солнечного вещества и дифференциальное вращение солнечных слоев в особенности [161], приливообразующая сила планет, а также перераспределение углового момента всей солнечной системы (который всегда постоянен) между планетами-гигантами и Солнцем [38, 230, 234, 241, 263] и, наконец, галактические магнитные поля [38, 39, 88]. Последний вопрос стал разрабатываться совсем недавно, после того как выяснилось, что галактические долготы Юпитера в эпохи экстремумов солнечной активности распределены не случайным образом, а группируются в местах пересечения орбиты Юпитера с плоскостью галактического экватора [38]. Около 90% долгот за период около 200 лет группируются около этих мест, причем изменение долготы в большую или меньшую сторону хорошо коррелирует с изменениями уровня

запятнненности. Это позволило выдвинуть гипотезу о том, что максимумы солнечной активности зависят от движения солнечной системы в Галактике. При этом крупномасштабное поле галактической спирали, в котором находится солнечная система, играет роль внешнего магнита в проводящем контуре Солнце — межпланетная среда — планеты. Вращение планет приводит к появлению переменной электродвижущей силы, вклад в которую Юпитера — планеты с наиболее сильным полем и наибольшей массой — доминирующий. Грубые оценки показывают, что энергия орбитального вращения Юпитера в галактическом поле вполне достаточна для генерации токов, общая энергия которых достаточна, чтобы компенсировать потери магнитной энергии на Солнце, эквивалентной 100 хромосферным вспышкам в год [39]. Если приведенные соображения получат подтверждение в дальнейших исследованиях, это будет означать, что галактические факторы через солнечную активность могут влиять на течение земных процессов.

В настоящем разделе мы остановимся на двух вопросах, которые имеют для наших целей особое значение: на возможностях сверхдолгосрочного прогнозирования солнечной активности и на периодах повышенной генерации протонов высокой энергии на Солнце. Первый вопрос связан с исследованием циклов большой длительности в деятельности Солнца, второй, наоборот, с исследованием циклов малой длительности, поскольку хромосферные вспышки связаны с периодами кратковременных, но резких изменений в запятнненности Солнца.

Сверхдолгосрочный прогноз солнечной активности дает возможность, используя известные статистические связи, предвидеть ход земных процессов на столетия вперед. В Европе до настоящего времени функционируют мосты, плотины, дренажные и ирригационные системы, построенные 500 и более лет назад. Многие из современных сооружений также рассчитаны на успешную работу в течение столетий. Отсюда возникает потребность в прогнозировании солнечной активности на одно-два столетия вперед для определения тенденций изменений климата.

За одно-два столетия (это можно гарантировать с высокой степенью достоверности) ни напряженность магнитного поля в той области Галактики, в которой нахо-

дится солнечная система, ни уровень космических лучей не испытают значительных изменений. Отсюда следует, что для прогнозирования на такой незначительный по астрофизическим масштабам срок солнечную систему можно рассматривать как изолированную от переменных влияний галактического Космоса. В таком случае группировка планет в одной части эклиптики будет важным временным репером, как и их рассредоточение вокруг Солнца, независимо от того механизма, посредством которого они будут воздействовать на солнечную активность. Эти конфигурации планет, как своеобразные временные реперы, могут быть использованы для сверхдолгосрочного прогнозирования солнечной активности.

На материале двухсотлетних наблюдений показано [241], что соединение планет-гигантов приводит к смещению центра тяжести Солнца относительно неподвижного центра масс всей солнечной системы так, что между этими двумя центрами расстояние меняется от 0,01 до 2,19 солнечного радиуса. Хотя общий угловой момент всей солнечной системы и не меняется, угловые моменты планет и Солнца испытывают определенные изменения. Можно предполагать, что на поверхности Солнца возникают возмущающие силы, пропорциональные изменениям углового момента за единицу времени, которые способствуют росту запятненности поверхности Солнца. Вычисляя последовательно координаты планет и изменения углового момента Солнца, можно получить ряд данных, которые возможно будет затем трансформировать в известные показатели солнечной активности, используя коэффициенты связи, найденные из обработки данных за известные годы наблюдений. По целому ряду причин такая работа требует больших затрат труда даже при наличии современных быстродействующих машин. Кроме того, этот путь малонагляден. Мы использовали более простой путь к решению той же задачи.

Примем скорость движения планет на орбитах равномерной. Введем величину относительной угловой скорости движения одной планеты относительно другой, соседней планеты. Тогда легко подсчитать время, которое проходит между соединениями этих двух планет. В табл. 1 приведены относительные угловые скорости движения планет от Юпитера до Плутона и соответствующие периоды их соединений.

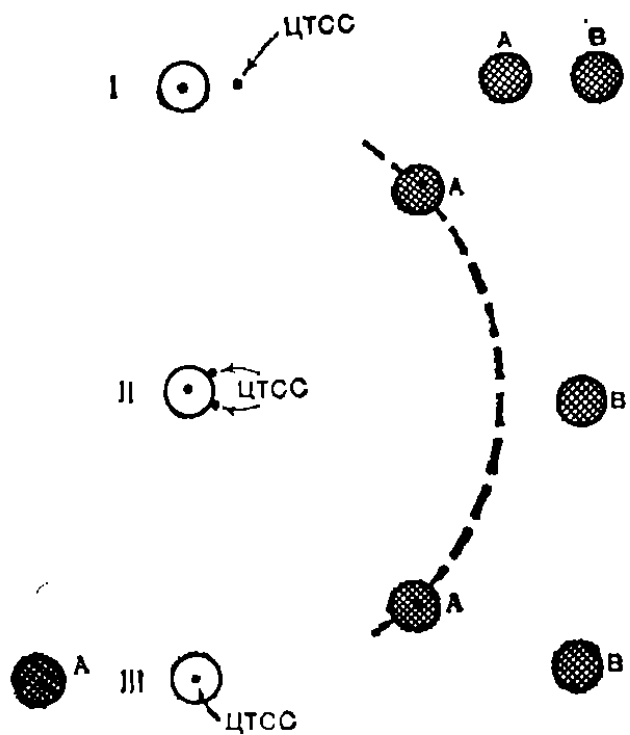


Рис. 1. Схема изменения центра тяжести солнечной системы (ЦТСС) в зависимости от геометрического положения планет (здесь и далее — рис. 1—16 — объяснения даются в тексте)

а угловой момент планет минимален, поскольку ЦТСС смещен в сторону планет (положение I). Когда планеты находятся на одной прямой по обеим сторонам от Солнца, центр тяжести Солнца совпадает с ЦТСС, планеты обладают максимальным угловым моментом (положение III). Однако в обоих положениях изменения углового момента во времени равны нулю. Изменения углового момента пропорциональны величине  $R \cdot \Delta R$ , где  $R$  — расстояние между центром Солнца и ЦТСС. Только в положении II, когда между планетами примерно равной массы образуется угол, равный примерно  $60^\circ$  в гелиоцентрической системе координат, изменения углового момента будут максимальны. Угловой момент Солнца в единицу времени будет при этом положении планет быстро убывать или нарастать. Приведенные соображения можно применить к таким парам планет, чьи массы не слишком различаются, как и расстояния их от Солнца. По этому принципу и построена табл. 1.

В то время как между минимумами солнечной запятненности должны быть равные отрезки времени (равные половине указанных в табл. 1 периодов), миниму-

Угловой момент Солнца почти не меняется, когда две планеты находятся на одной прямой от Солнца. Тогда возмущающие силы оказываются минимальными и минимальна запятненность Солнца. Все циклы, указанные в табл. 1, по этой причине оказываются практически двойными циклами с двумя максимумами запятненности и двумя минимумами в каждом периоде.

Рис. 1 поясняет геометрическое положение планет (A и B), центра тяжести Солнца и центра тяжести солнечной системы (ЦТСС). В момент соединения планет угловой момент Солнца максимален,

Таблица 1

Относительные угловые скорости  
между планетами (в градусах на месяц)  
и время между соединениями планет

	Юпитер	Уран	Плутон
Сатурн	1,5107 $\frac{\text{град.}}{\text{мес.}}$ 238,30 мес. 19,858 года	0,6613 $\frac{\text{град.}}{\text{мес.}}$ 544,38 мес. 45,365 года	
Нептун	—	0,1750 $\frac{\text{град.}}{\text{мес.}}$ 2057,14 мес. 171,428 года	0,06234 $\frac{\text{град.}}{\text{мес.}}$ 5774,8 мес. 481,233 года

мами активности эти периоды должны делиться примерно в отношении 1:2. Так, период в 171,4 года по минимумам солнечной активности должен быть примерно 86-летним циклом, по максимумам он должен делиться на 58- и 114-летние периоды. Соединения Юпитера, Сатурна и Урана, возможно, вместе с приливными воздействиями планет земной группы и определяют продолжительность и структуру основных циклов солнечной активности 11- и 22-летних циклов [39, 241, 244]. Однако для целей долгосрочного прогнозирования солнечной активности эти циклы не столь интересны. От них можно избавиться, проделав определенную фильтрацию высокочастотной части колебаний солнечной активности.

На рис. 2 сплошной жирной кривой показан сглаженный с использованием биномиальных коэффициентов

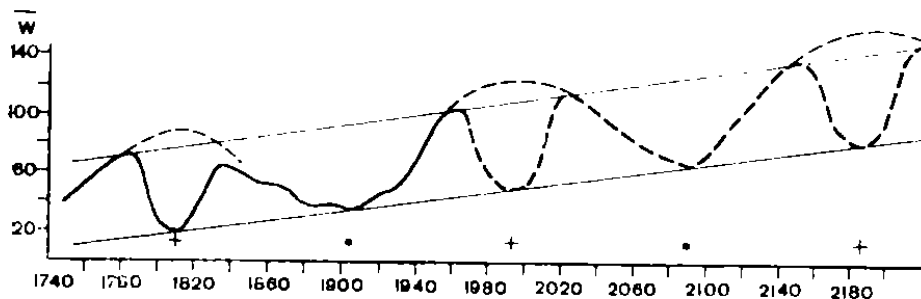


Рис. 2. Сглаженный ход чисел Вольфа и их экстраполяция



ход годовых чисел Вольфа за двухсотлетний период наблюдений. Если рассматривать влияние на активность Солнца не двух, а четырех планет — Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, то легко обнаружится примерно 178-летний цикл. В этот период укладываются девять соединений Сатурна и Юпитера, четыре соединения Урана и Сатурна и одно соединение Урана и Нептуна ( $19,9 \times 9 = 179,1$  года,  $45,4 \times 4 = 181,6$  года,  $171,4 \times 1 = 171,4$  года). Используя таблицу периодов парных соединений планет, легко получить, как видим, и периоды соединений трех, четырех и более планет. Так, примерно через 178 лет Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун группируются около прямой, выходящей из центра Солнца, как бы соединяются в узком интервале гелиодолгот.

Недавние исследования, проведенные Т. Судой и другими авторами, показали, что продолжительность «основного» цикла солнечной активности составляет в действительности около 178 лет. Из тщательных исследований цикличности чисел Вольфа за 250 лет О. Б. Васильев [37] нашел два устойчивых периода продолжительностью в 11,1 и 9,9 года. Эти два периода укладываются целое число раз в 89- и 178-летних циклах ( $11,1 \times 8 = 88,8$  лет,  $9,9 \times 9 = 89,1$  лет,  $11,1 \times 16 = 177,6$  лет,  $9,9 \times 18 = 178,2$  лет). Здесь интересно учесть и выводы, сделанные Т. Судой, который обосновывал важность 178-летнего цикла солнечной активности следующими соображениями. Он считал, что цикл продолжительностью 22,2 года обусловлен процессами, протекающими в недрах Солнца, в то время как цикл 11,86 года связан с вращением Юпитера вокруг Солнца, возможно, вращением его в галактических магнитных полях. Оба эти цикла укладываются целое число раз в 178-летнем солнечном цикле и потому этот цикл имеет особое значение ( $22,22 \times 8 = 177,8$  года;  $11,86 \times 15 = 177,9$  года) [263].

Поскольку цикл состоит как бы из двух половин, причем между минимумами проходит около 90 лет, а между максимумами примерно 60 и 110 лет, как и подсказывалось общими физическими соображениями, то в течение земных процессов этот цикл известен в основном как 85—90-летний цикл. В табл. 2 мы приводим список пяти наиболее длинных рядов наблюдений, имеющихся у исследователей климата и наиболее продолжительных циклов колебаний в них, обнаруженных

по данным работы [8]. Средняя продолжительность цикла оказывается равной 87 годам, что и составляет почти половину от 178-летнего цикла. Интересно, что Кеппен, исследуя этот вековой цикл по данным многих европейских станций, оценил его продолжительность в 89 лет. Примерно такую же продолжительность векового цикла находили исследователи ленточных глин и илов.

Опираясь на 200-летний ряд наблюдений, Джозе не смог выявить более продолжительные циклы: цикл продолжительностью около 500 лет ( $171,4 \times 3 = 514,2$  года;  $45,4 \times 11 = 499,4$  года;  $481,2 \times 1 = 481,2$  года) и цикл продолжительностью около 1900 лет ( $481,2 \times 4 = 1925$  лет;  $171,4 \times 11 = 1885$  лет), которые образуются группировкой в узком интервале гелиодолгот четырех и трех из наиболее удаленных планет. Цикл продолжительностью около 500 лет исследователи находили в вариациях земного магнитного поля, в колебаниях увлаженности больших территорий, числе полярных сияний, в изменениях амплитуды 80-летних колебаний, определяемых по характеристикам земных явлений [161]. Цикл продолжительностью 1900 лет является классическим по яркости своего проявления во всех показателях физико-географического плана, в вариациях магнитного поля Земли, в вулканизме, в толщине осадочных пород, в колебаниях уровня Мирового океана [22, 161, 209].

Трудно сказать, является ли этот цикл самым продолжительным и самым мощным в активности Солнца, но несомненно, что он находит проявление в земных условиях, как и 89-летний цикл. По-видимому, в этом продолжительном цикле не существует столь четкого провала на максимуме цикла, как в 178-летнем цикле, что можно объяснить отсутствием близкого периода, обусловленного соединениями двух планет. Именно поэтому проявление 178- и 500-летних циклов оказывается очень слабым в земных условиях, а 89- и 1900-летние циклы проявляются достаточно четко. Впрочем, можно предложить и другие объяснения этому факту.

Сверхдолгосрочное прогнозирование солнечной активности можно строить на экстраполяции 178, 500 и 1900-летних циклов, имея в виду, однако, что причины, их порождающие, общие. Возвращаясь к рис. 2, попытаемся продолжить кривую на 200 лет вперед, исходя из того, что имеются два относительно независимых цикла в солнечной активности, продолжительностью 178 и 1900

Таблица 2

Проявление векового цикла в показателях, отражающих климатические изменения

Показатель	Средняя продолжительность периода (в годах)
1. Ледовитость северной части Атлантического океана (1590—1940 гг.)	83
2. Средний уровень Каспийского моря (1610—1940 гг.)	85
3. Средняя годовая температура воздуха в Копенгагене (1798—1930 гг.), Берлине (1769—1921 гг.) и Риме (1811—1924 гг.)	94
4. Суровость зим в Западной Европе (1215—1905 гг.)	90
5. Толщина годовых колец секвойи в Калифорнии (1295 г. до н. э. — 1905 г. н. э.)	84

лет. Наибольшее сближение Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна происходило около 1810 г., следующее произойдет примерно в 1990 г. (крестики на рисунке). Подсчеты показывают, что такое событие еще раз повторится и около 2190 г. В эти моменты планеты должны группироваться по одну сторону от Солнца в небольшом долготном интервале (положение I на рис. 1). Обозначенные на рисунке временные интервалы делятся пополам (точки на рис. 2), чтобы получить минимальные значения запятненности в 178-летних циклах. Точки максимумов должны быть расположены на расстоянии, равном примерно 30 годам от моментов группировки планет по одну сторону от Солнца, то есть от моментов, обозначенных на рис. 2 крестиками.

Из кривой видно, что высоты максимумов и минимумов не равны между собой, и это обстоятельство можно объяснить вмешательством 1900-летнего цикла в проявление 178-летнего цикла. Тонкие параллельные прямые на рис. 2, проведенные через точки экстремумов, выявляют амплитуду 178-летнего цикла и темп роста солнечной активности в 1900-летнем цикле.

Поскольку сближение Урана, Нептуна и Плутона произойдет где-то около 2350 г., в современную эпоху должно наблюдаться быстрое нарастание солнечной активности в 1900-летнем цикле. Этот факт хорошо согласуется с материалами наблюдений.

Как это ни покажется странным, но долгосрочный прогноз солнечной активности, основанный на учете влияния планет, имеет определенные черты сходства с даваемыми сейчас прогнозами солнечной активности статистическими методами и по методу аналогов. Так, ближайшие 11-летние циклы, как ожидают многие исследователи солнечной активности, будут очень низкими, на уровне циклов, что наблюдались около 1900 г. В долгосрочном прогнозе, данном Васильевым и Кандауровой на 80 лет вперед [38], указывается, что к 2040 г. произойдет резкое увеличение мощности солнечных циклов, что в общем согласуется и с нашими данными.

Всякий прогноз, в основе которого имеются хоть какие-то физические предпосылки, имеет перед чисто статистическим прогнозом то преимущество, что позволяет прогнозисту осознанно искать пути к его совершенствованию даже при неудачных прогнозах и, что особенно ценно, позволяет предсказывать такие события, которые не зарегистрированы в рядах наблюдений прошлых лет.

Теперь мы рассмотрим другую возможность использования конфигураций положения планет для объяснения более коротких циклов в деятельности Солнца — циклов от нескольких месяцев до нескольких лет. Этот механизм основан на учете приливообразующих сил, которые воздействуют на поверхностные слои Солнца. И в данном случае теория вопроса недостаточно ясна, хотя успех эмпирических сопоставлений способствовал написанию за последнее столетие десятков статей, неполный список которых можно найти в [38, 39, 230, 234, 263].

Под воздействием сил тяготения планет на поверхности Солнца, в ее фотосферных слоях возникают очень небольшие приливные волны, высотой порядка 1 мм от каждой из четырех приливообразующих планет: Меркурия, Венеры, Земли и Юпитера. Приливные волны увеличиваются, если две, три или четыре планеты располагаются на одной прямой, проходящей через центр Солнца по одну или по обе стороны от него. В такие моменты высота прилива достигает 2—3 мм [39, 161, 231]. В хромосфере Солнца эта величина возрастает в несколько раз, в нижней короне Солнца — в десятки раз. Много это или мало, можно будет сказать лишь после того, как будет разработана теория солнечной активно-

сти. Однако определенный успех экспериментальных работ внушает уверенность, что, возможно, небольшая часть видимой запятненности солнечного диска обусловлена воздействием приливообразующих сил планет. Еще большая уверенность проявляется в важности учета этого фактора, когда мы переходим к процессам, протекающим в хромосфере и короне Солнца. Последние данные о солнечных космических лучах [72, 102, 265] указывают на наличие хорошей связи между генерацией их на Солнце и активностью короны. Солнечные частицы ускоряются до больших энергий в хромосфере и короне Солнца, и потому их появление у Земли лучше всего коррелирует не с фотосферной запятненностью диска Солнца, а с яркостью зеленой (5303 Å) и желтой (5694 Å) корональных линий.

Таким образом, если космические лучи более или менее постоянно генерируются в хромосферных вспышках и воздействуют определенным образом на течение земных процессов, то конфигурация четырех приливообразующих планет будет определять в какой-то мере течение этих процессов. Какие основания есть для такого заключения?

Воспользуемся тем же методом, что мы применили раньше, и вычислим промежутки времени между наложениями приливных волн на поверхности Солнца. В табл. 3 приведены эти величины в месяцах. На основании этой таблицы можно составить новую таблицу, в которой будут учтены соединения двух, трех и четырех планет. Эту таблицу легко построить, если учесть, что неизменными участниками всех этих соединений должны быть Венера и Юпитер, приливообразующая сила которых составляет более 60% от приливообразую-

*Таблица 3*  
**Промежутки времени**  
**между парными соединениями**  
**планет (в месяцах) с обеих сторон от Солнца**

	Юпитер	Меркурий	Земля
Меркурий	1,5		
Земля	6,6	1,9	
Венера	3,9	2,4	9,6

Таблица 4

Периоды соединений приливных волн  
на поверхности Солнца,  
вызванных соединениями двух,  
трех и четырех планет

Планеты	Периоды парных соединений	Средняя продолжительность цикла
Юпитер — Венера	Соединение двух планет $3,9 \times 1 = 3,9$ $3,9 \times 2 = 7,8$	3,9 мес. 7,8 мес.
Юпитер — Венера Венера — Земля Юпитер — Земля	Соединение трех планет $3,9 \times 4 = 15,6$ $9,6 \times 2 = 19,6$ $6,6 \times 3 = 19,8$	17 мес.
Юпитер — Венера Венера — Меркурий Юпитер — Меркурий	$3,9 \times 4 = 15,6$ $2,4 \times 6 = 14,4$ $1,5 \times 10 = 15,0$	15 мес.
Юпитер — Венера Меркурий — Земля	Соединение четырех планет $1,9 \times 6 = 11,4$ } $3,9 \times 3 = 11,7$ } $1,9 \times 7 = 13,3$ } $3,9 \times 3 = 11,7$ }	11,6 мес. 12,6 мес.

щей всех планет [231, 265]. Из табл. 4 видно, что имеется целый набор циклов, наличие которых в некотором земном процессе может служить доказательством тому, что данный процесс находится под контролем хромосферной и корональной активности Солнца.

Прежде всего мы попытались найти указанные циклы в фотосферных образованиях Солнца: в площадях теней, полутеней, пятен и факелов. Наличие даже слабых сигналов на соответствующих частотах служило бы доказательством того, что приливообразующие силы планет оказывают свое воздействие на фотосферные слои и тем более должны оказывать свое влияние на слои, более удаленные от центра Солнца. На рис. 3 приводятся два участка спектров трех названных выше характеристик солнечной активности. Сплошные кривые — оценки

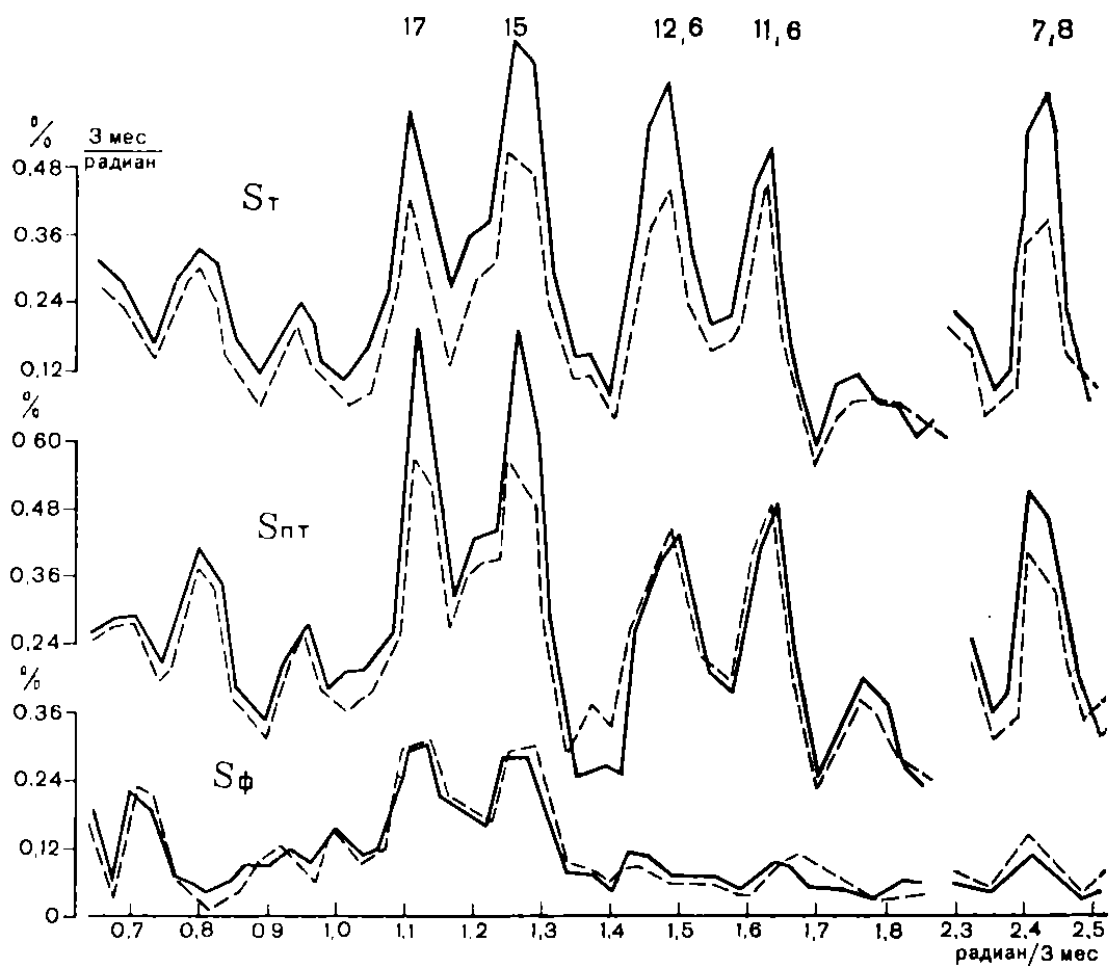


Рис. 3. Спектры некоторых характеристик солнечной активности

спектральной плотности, вычисленные по среднемесячным значениям, штриховые кривые — те же величины при трехмесячном осреднении исходных данных. Из рисунка видно, что указанные в табл. 4 периоды прослеживаются четко в площадях теней —  $S_T$  и полутеней —  $S_{пт}$  пятен, кроме периода 3,9 месяца. Это не удивительно, если учесть, что характерное время жизни больших пятен достигает трех-четырёх оборотов Солнца. Характерное время жизни факелов в 2 раза больше, поэтому становится понятным, почему в спектре этой характеристики —  $S_{ф}$  не нашли свое проявление циклы продолжительностью 7,8, 11,6 и 12,6 месяца.

Если 11-летний цикл определяет более 90% всех видимых изменений запятненности, то в земных процессах он, как правило, недостаточно выражен. Характеристики межпланетной среды, как стало известно по последним данным, также слабо меняются в 11-летнем цикле; слабо связаны с 11-летним циклом и хромосферные вспышки. Из этого следует, что наиболее интересные особенности хода земных процессов и притока

заряженных протонов высокой энергии к Земле оказываются вне поля нашего зрения, если мы ограничиваемся только запятненностью Солнца.

С 1935 г. по настоящий день в различных секторах советской Арктики работает сеть геомагнитных станций, регистрирующих вариации горизонтальной составляющей поля. Нами были использованы данные за 37-летний период для расчетов спектральных оценок геомагнитной возмущенности по станциям Хейс, Челюскин, Диксон и Уэллен. На рис. 4 приведены кривые оценок

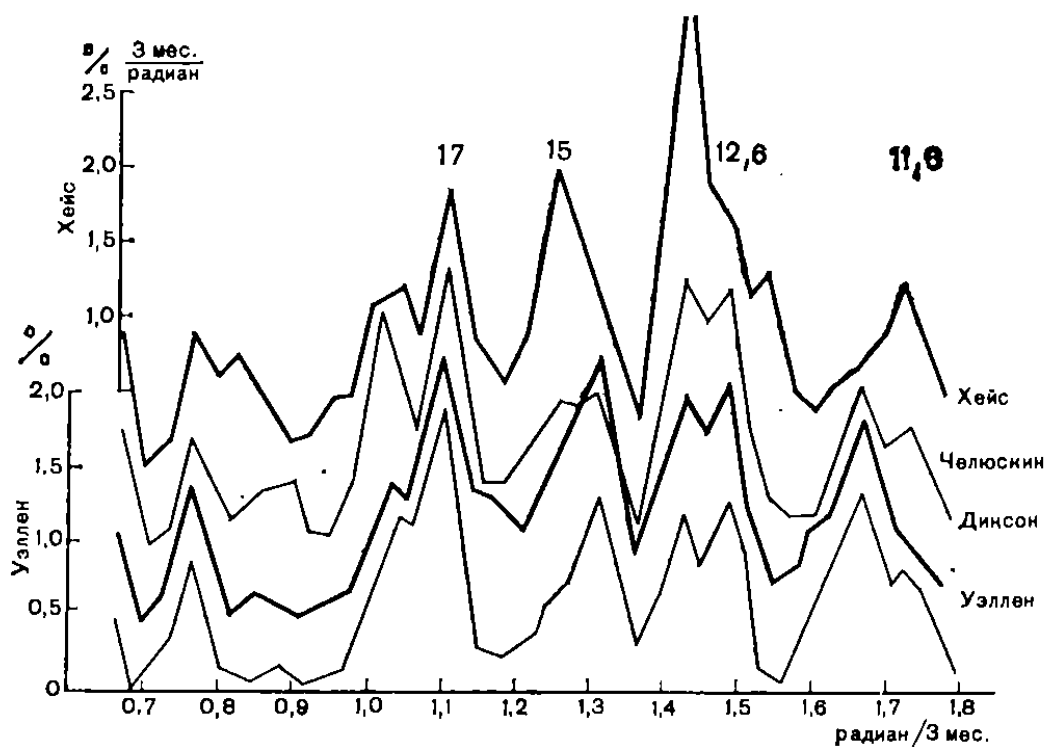


Рис. 4. Спектральные плотности геомагнитной возмущенности по четырем наблюдательным станциям

спектральной плотности по этим станциям. Обращает на себя внимание четкое проявление четырех циклов продолжительностью 17, 15, 12,6 и 11,6 месяца, которые выбирают до 25% от общей дисперсии рядов. В геомагнитных данных мощность 11-летнего цикла оказалась в несколько раз меньшей, чем в данных по запятненности Солнца.

Рассмотренные выше циклы упоминались в работах разных авторов. Так, в метеорологических рядах не раз обнаруживали цикл продолжительностью 7,8 месяца, в геофизических и солнечных данных — циклы, близкие к одному году, но никогда, насколько нам известно, не рассматривалась совокупность циклов. Нам думается,



что определение сразу многих линий в спектре даст спектральным методам в метеорологии ту необходимую надежность в определении природы процессов, какой обладают спектральные методы определения химического состава вещества по набору линий в оптическом спектре.

Появление в рядах чисел Вольфа периодов продолжительностью 0,6—0,8 и 1,1—1,5, 2, 4 года отмечено рядом исследователей [86, 95]. Отмечается, что соответствующие линии в спектре то появляются на два-три десятка лет, то исчезают. Отмечена их связь с 80-летним циклом солнечной активности, делаются попытки учесть их в прогнозе чисел Вольфа. Действительно, как это и следует из табл. 4, все указанные циклы в соединениях трех и четырех планет не должны прослеживаться постоянно. За счет несовпадения периодов соединения происходит «автоматическая» настройка цикла и «автоматическое» его разрушение, что в принципе можно предвидеть и учитывать при прогнозах земных явлений.

Уже известны попытки использования положения планет для предсказаний протонных вспышек в целях обеспечения безопасности космических полетов, а также для предсказания космической обстановки в целом [252].

### Ритмы межпланетной среды

В предыдущей главе были рассмотрены некоторые циклы солнечной активности, использование которых может оказаться полезным для долгосрочного прогнозирования самой солнечной активности и процессов, протекающих на Земле, на течение которых солнечная активность имеет определенное влияние. Было указано, что периоды притока солнечных космических протонов высокой энергии к Земле могут иметь определенную цикличность.

Были рассмотрены два физических механизма влияния планет на активность Солнца: приливообразующее действие планет и перераспределение углового момента между Солнцем и планетами-гигантами. Однако существует еще один физически ясный механизм, генерирующий с помощью геометрического положения планет определенные циклы в характеристиках межпланетных

магнитных полей. Этот механизм связан с воздействиями Венеры, Земли, Луны, Марса и Юпитера, а также крупных метеорных потоков на натекающую на них с большой скоростью солнечную плазму.

Чтобы внести с самого начала ясность в вопрос, представим себе Солнце в минимуме солнечной активности. В такие периоды на Солнце не наблюдается пятен, отсутствуют хромосферные вспышки и вспышки в радиоизлучении, корона однородна и не ярка. В межпланетное пространство утекает однородная плазма с ослабленным магнитным полем. Эта однообразная межпланетная среда, движущаяся со сверхзвуковой скоростью, натекает на планеты, астероиды, метеорные потоки; в ней возникают ударные волны, которые движутся в космическом пространстве вместе с движущимися по своим орбитам твердыми телами [249]. Ударная волна — это возмущение, за которым параметры межпланетной среды, плотность частиц и напряженность магнитного поля оказываются иными, чем они были в невозмущенном состоянии. Естественно, когда Солнце сильно запятнено и на нем происходят бурные процессы, структура межпланетной среды возмущена настолько, что возмущения, связанные со стоячими ударными волнами от планет, теряются. Кроме того, сами характеристики таких ударных волн оказываются непостоянными: они меняются в зависимости от параметров набегающего плазменного потока и их воздействие на структуру межпланетной среды, а также на космические лучи, проходящие через нее, оказывается не столь эффективным.

Если бы частотная структура солнечной активности, связанной с приливообразующей силой планет, и частотная структура возмущений, связанная с появлением ударных волн в межпланетной среде около планет, были одинаковыми, то ситуация стала бы довольно сложной. К счастью, частотная структура этих двух процессов существенно различна. В первом случае нам неважно, находятся ли планеты на прямой, проходящей через центр Солнца, по одну сторону или по обе стороны от него. Во втором случае необходимо, чтобы планеты, возмущающие межпланетную среду, обязательно находились по одну сторону от Солнца, чтобы ударные волны (напоминающие по форме воланчик от бадминтона), уходящие на сотни тысяч километров вниз по по-

току, вкладывались одна в другую, образуя своеобразный канал, по которому галактические космические лучи могут проникнуть на орбиту Земли. На рис. 5 приведено положение трех планет — А, В и С, пространство за ударными конусами которых сливается в один общий канал, по которому космические лучи с периферии солнечной системы могут проникнуть в ее внутренние части.

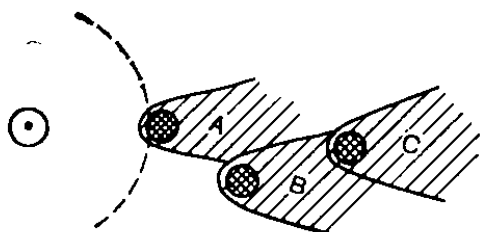


Рис. 5. Схема образования «ударных конусов» планетами

Ряд работ [238, 240] указывает на то, что в моменты «соединения» Земли с Меркурием, Венерой, Марсом и Юпитером наблюдается определенное снижение геомагнитной активности, регистрируемой на наземных станциях. Поскольку магнитная возмущенность, наблюдаемая на Земле, отражает скорости солнечной плазмы, магнитные поля, «вмороженные» в нее, а также изменчивость этих характеристик в Космосе, то можно утверждать, что «соединение» планет с Землей изменяет характеристики околоземного Космоса. Авторы приведенных выше работ прямо указывают на ударные волны как на единственное возможное объяснение наблюдаемым эффектам. Снижение геомагнитной активности на Земле косвенно говорит о том, что объединение ударных конусов уменьшает напряженность магнитного поля у «соединяющихся» планет, приводит к более благоприятным условиям для увеличения облучения Земли космическими лучами. Если космические лучи воздействуют на течение земных процессов, то в таком случае ритмика, связанная со сближением планет в узком интервале гелиодолгот, будет прослеживаться в ходе этих процессов.

активности, регистрируемой на наземных станциях. Поскольку магнитная возмущенность, наблюдаемая на Земле, отражает скорости солнечной плазмы, магнитные поля, «вмороженные» в нее, а также изменчивость этих характеристик в Космосе, то можно утверждать, что «соединение» планет с Землей изменяет характеристики околоземного Космоса. Авторы приведенных выше работ прямо указывают на ударные волны как на единственное возможное объяснение наблюдаемым эффектам. Снижение геомагнитной активности на Земле косвенно говорит о том, что объединение ударных конусов уменьшает напряженность магнитного поля у «соединяющихся» планет, приводит к более благоприятным условиям для увеличения облучения Земли космическими лучами. Если космические лучи воздействуют на течение земных процессов, то в таком случае ритмика, связанная со сближением планет в узком интервале гелиодолгот, будет прослеживаться в ходе этих процессов.

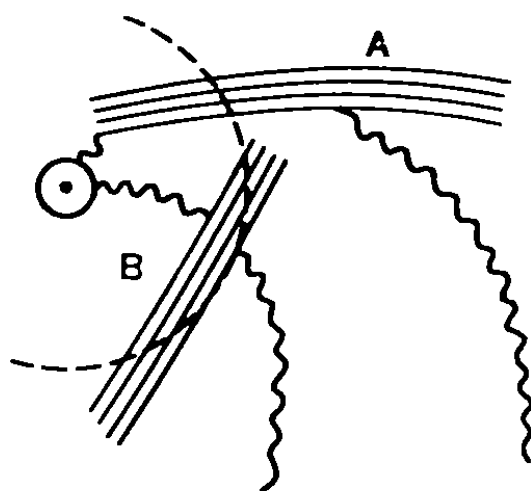


Рис. 6. Схема встречи корпускулярных потоков и силовых магнитных линий

Такой канал могут формировать в космическом пространстве и потоки метеоритов, которые имеют достаточно вытянутые орбиты в пределах солнечной системы. Приходя из окраин солнечной системы к Солнцу, частички метеоритных потоков ионизируются под действием солнечных излучений и начинают взаимодействовать с межпланетным магнитным полем, увлекая его за собой. Магнитные поля вытягиваются вдоль по метеорному потоку, появляется своеобразный канал, вдоль которого космические лучи из окраинных областей солнечной системы могут подходить к орбите Земли. На рис. 6 показано Солнце и сплошными жирными кривыми — корпускулярные потоки с различными неоднородностями, благодаря которым они «выметают» протоны высокой энергии из околоземного космического пространства. Тонкими прямыми показано направление силовых магнитных линий в метеорных потоках, идущих вдоль по направлению межпланетных магнитных полей (метеорный поток А) и поперек межпланетных магнитных полей (метеорный поток В). Штрихами на рисунке показана орбита Земли.

Проведено исследование [20] эффекта возрастания космических лучей, регистрируемых на поверхности Земли, в моменты прохождения Землей основных метеорных потоков. В определенный день года Земля пересекает один и тот же метеорный поток и, если бы имелись наблюдения за космическими лучами в течение шести — восьми десятков лет, то осреднение данных по всем дням года за этот промежуток времени дало бы возможность построить кривую годового хода космических лучей. На этой кривой можно было бы увидеть периоды увеличения притока космических лучей к Земле в моменты пересечения Землей метеорных потоков, а также с помощью этой кривой провести сравнение эффективности разных метеорных потоков. К сожалению, систематические наблюдения с помощью нейтронных мониторов ведутся лишь в течение двадцати лет. С помощью метода наложения эпох был исследован [20] средний эффект возрастания космических лучей при прохождении Землей основных метеорных потоков. На рис. 7 верхняя кривая показывает средний эффект возрастания космических лучей при пересечении Землей метеорного потока, средняя кривая — при пересечении потока типа А, нижняя кривая — при пересечении потока типа

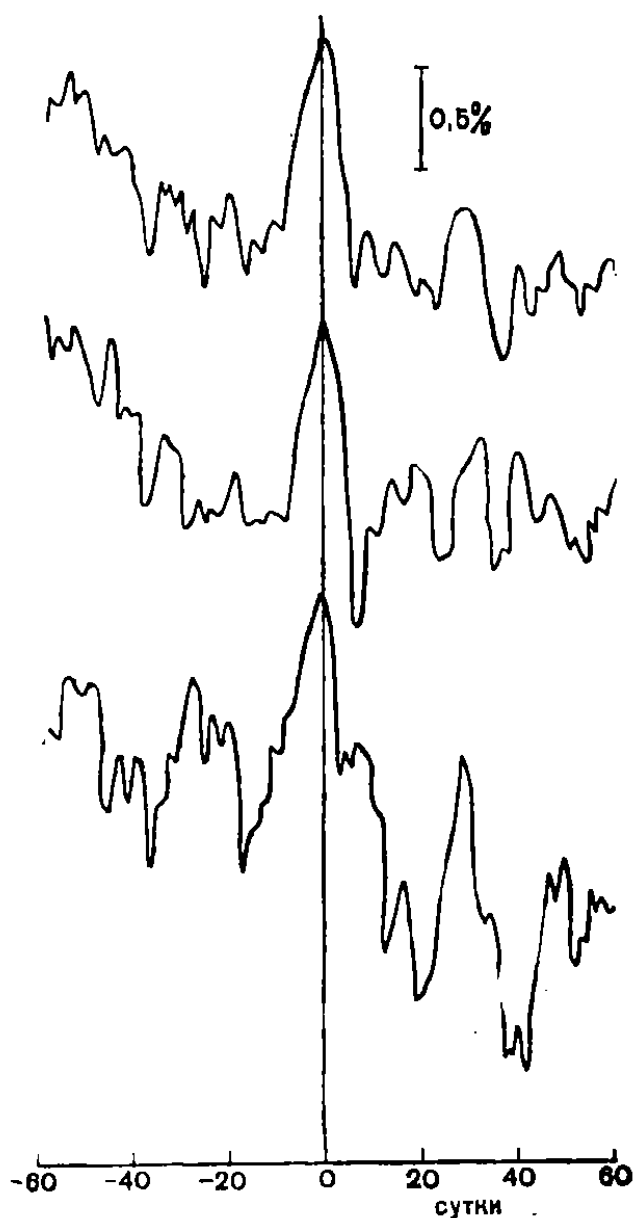


Рис. 7. Эффект возрастания космических лучей при прохождении Землей метеорных потоков разного типа

В. Легко видеть, что независимо от ориентации метеорного потока в солнечной системе по отношению к межпланетным магнитным полям эффект возрастания остается примерно одним и тем же. Около 15 суток длится этот эффект возрастания космических лучей, достигающий иногда нескольких процентов. Автор работы отмечает, что эффекты возрастания особенно сильны на восходящей и нисходящей ветвях солнечной активности, но не в максимуме. Это согласуется и с общими физическими соображениями о влиянии планет и метеорных потоков на структуру межпланетного пространства и с материалами наблюдений над магнитными полями в Космосе [228, 238, 240, 267].

За долгую историю развития метеорологии неоднократно обращалось внимание на связь метеорных потоков с погодой, облачностью и осадками. Многократно исследовались и так называемые календарные особенности в ходе температуры, давления и осадков. Не обсуждая сейчас в деталях результаты этих работ, большинство из которых уже достаточно устарели как по использованному материалу, так и по методам его обработки, здесь следует отметить перспективность их развития в ближайшие 20—30 лет, когда ожидаемый уровень солнечной активности не будет слишком высок. Разделение серий лет с высокой солнечной активностью от лет с низкой активностью, по-видимому, необходимо в подобных исследованиях.

На рис. 8 приводятся скользящие трехдневные суммы повторяемости глубоких циклонов в центральной Канаде (кривая 1), в северо-западной Атлантике (кривая 2), в восточной Атлантике (кривая 3) и на севере Европы (кривая 4). Все кривые получены путем осреднения 15-летних данных [30]. Видна закономерная связь пиков на кривых; пики в первом районе наступают раньше, чем в четвертом. Наконец, три первых района, расположенные в непосредственной близости от геомагнитного полюса Земли, обладают более четкими календарными особенностями, чем другие районы. Можно

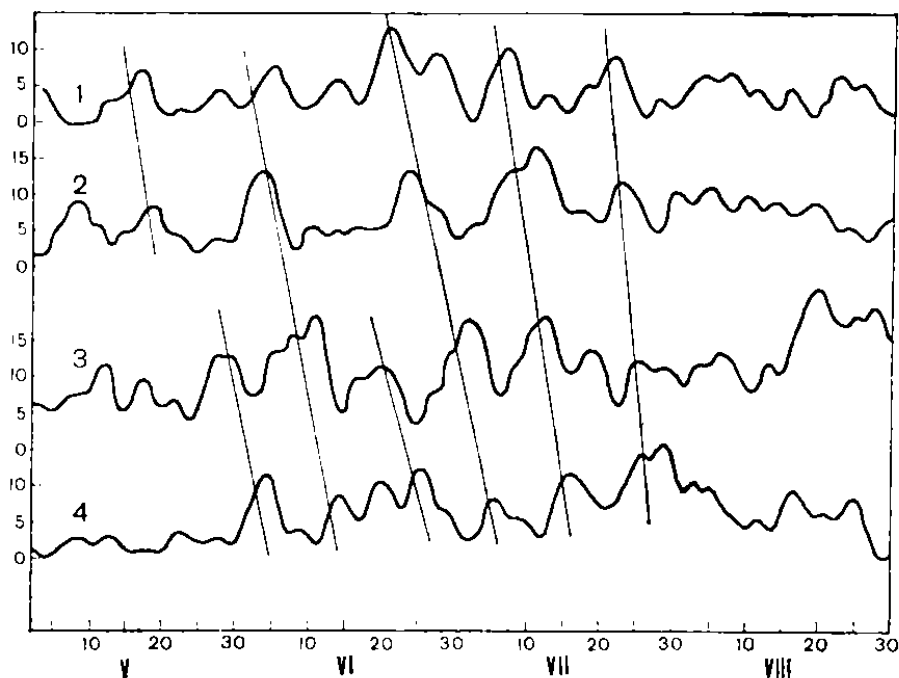


Рис. 8. Повторяемость глубоких циклонов в разных частях Земли

добавить, что именно в этот период года Земля пересекает несколько мощных метеорных потоков.

Вопрос, безусловно, требует дальнейших тщательных исследований; с его помощью будет возможно оценить связи вариаций космических лучей, регистрируемых на поверхности Земли, с теми изменениями, которые в то же время испытывает общая циркуляция атмосферы.

Возвращаясь к вопросу о создании канала для космических лучей ударными волнами, возникающими около планет, применим ту же методику, которую мы использовали ранее. В табл. 5 приведены промежутки времени между парными соединениями планет от Меркурия до Юпитера, включая Марс. По современным представлениям, наиболее мощные ударные волны возникают около планет, обладающих магнитными полями:

натекающая плазма обтекает магнитное поле планеты, возмущается и образует ударную волну [249]. Достаточно сильными магнитными полями (в сравнении с магнитными полями Космоса) обладают лишь Земля и Юпитер и, вероятно, Сатурн. Последний расположен далеко от Солнца — там, где солнечный ветер и его характеристики уже приближаются к характеристикам галактической среды. Кроме того, он расположен, даже по масштабам межпланетного Космоса, так далеко от орбиты Земли, что его влиянием, как и влияниями всех остальных планет, можно пренебречь. Планеты, обла-

*Таблица 5*

**Промежутки времени  
между парными соединениями  
планет (в месяцах)  
с одной стороны от Солнца**

	Юпитер	Меркурий	Земля	Марс
Юпитер				26,8
Меркурий	2,97			3,3
Земля	13,1	3,8		25,6
Венера	7,8	4,8	19,2	11,3

дающие атмосферой, такие, как Венера и Марс, должны давать меньшие возмущения межпланетной среды, и совсем малые ее возмущения должны давать планеты и спутники планет, лишенные атмосферы. В таблице мы учли лишь Меркурий, хотя с не меньшим основанием сюда можно было бы включить и Луну. Однако о Луне мы будем специально говорить в конце этого параграфа. Здесь для простоты таблицы она не учитывалась.

Из табл. 5 видно, что периоды сближения планет по одну сторону от Солнца отличаются от тех периодов, когда происходит сложение приливообразующих волн на поверхности Солнца (см. табл. 4). Это различие подчеркивается еще и тем, что здесь учитывается эффект, связанный с планетой Марс, чего раньше можно было не делать, поскольку приливообразующая сила этой планеты ничтожна на поверхности Солнца. Как источник возмущений межпланетной среды Марс, по-видимому, ничем не уступает Венере.

На основании данных табл. 5 можно, как это делалось раньше, составить сводную таблицу циклических возмущений межпланетной среды, вызываемых сближениями планет. Если раньше в основу такой таблицы были положены соединения Венеры и Юпитера — двух планет, обладающих наиболее сильными приливообразующими силами на поверхности Солнца, то сейчас в основу таблицы разумно положить соединения Земли с Юпитером — двух планет, обладающих наиболее мощными ударными волнами.

Таблица 6

Циклические возмущения  
межпланетной среды,  
вызываемые сближением планет

Планеты	Периоды парных соединений	Средняя продолжительность циклов (месяцы)
Меркурий — Земля	$3,8 \times 2 = 7,6$	7,6
Меркурий — Венера	$4,8 \times 2 = 9,6$	9,6
Меркурий — Земля	$3,8 \times 3 = 11,4$	10,6
Меркурий — Венера	$4,8 \times 2 = 9,6$	
Меркурий — Земля	$3,8 \times 4 = 15,2$	14,7
Меркурий — Земля	$4,8 \times 3 = 14,4$	
Меркурий — Земля	$3,8 \times 5 = 19,0$	19,0
Меркурий — Венера	$4,8 \times 4 = 19,2$	
Земля — Венера	$19,2 \times 1 = 19,2$	23
Меркурий — Земля	$3,8 \times 6 = 22,8$	
Меркурий — Венера	$4,8 \times 5 = 24,0$	13,1
Юпитер — Земля	$13,1 \times 1 = 13,1$	
Юпитер — Земля	$13,1 \times 2 = 26,2$	26
Марс — Земля	$25,6 \times 1 = 25,6$	
Марс — Юпитер	$26,8 \times 1 = 26,8$	39
Юпитер — Земля	$13,1 \times 3 = 39,3$	
Юпитер — Венера	$7,8 \times 5 = 39,0$	53
Земля — Венера	$19,2 \times 2 = 38,4$	
Юпитер — Земля	$13,1 \times 4 = 52,4$	78
Юпитер — Венера	$7,8 \times 7 = 54,6$	
Юпитер — Марс	$26,8 \times 2 = 53,6$	78
Земля — Марс	$25,6 \times 2 = 51,2$	
Юпитер — Земля	$13,1 \times 6 = 78,6$	78
Венера — Земля	$13,2 \times 4 = 76,6$	
Венера — Марс	$11,3 \times 7 = 79,1$	78
Венера — Юпитер	$7,8 \times 10 = 78,0$	
Земля — Марс	$25,6 \times 3 = 76,8$	78
Юпитер — Марс	$26,8 \times 3 = 80,4$	



В табл. 6 приведены циклы возмущений межпланетной среды. Таблица разделена на две части: в первой рассматриваются возмущения межпланетной среды, связанные с соединениями Меркурия, Венеры и Земли, во второй — с соединениями планет от Венеры до Юпитера. Разделение таблицы на две части обуславливалось тем, что соединения Меркурия, Венеры и Земли должны вызывать более четкие возмущения, регистрируемые с помощью геомагнитного поля Земли. Эти планеты расположены выше по течению солнечной плазмы, и вызываемые ими возмущения легче зарегистрировать на орбите Земли. Но эти возмущения не обеспечивают благоприятной ситуации для притока протонов высокой энергии во внутренние области солнечной системы. Соединения планет от Венеры до Юпитера должны вызывать меньшие возмущения в геомагнитном поле, но большие вариации в притоке высокоэнергичных частиц к Земле. Для процессов, протекающих на Земле, эти циклические возмущения должны иметь большее значение, если эти процессы контролируются притоком космических лучей.

Существуют три относительно независимых друг от друга показателя геомагнитной активности Земли: среднемесячный уровень геомагнитной возмущенности, число геомагнитноспокойных дней в месяце (индекс «С» равен 0 или 1) и число геомагнитновозмущенных дней в месяце (индекс «С» равен 8 или 9). Два первых ряда несут определенную информацию о структуре околоземного космического пространства, третий ряд отражает в основном уровень хромосферной активности Солнца, моменты прохождения Землей очень сильных возмущений, возникающих в межпланетной среде в результате взрывов на Солнце.

На рис. 9 приведены оценки спектральной плотности для двух первых показателей, вычисленных по 80-летним рядам наблюдений; тонкой кривой показаны спектральные оценки, вычисленные по среднемесячным значениям геомагнитной возмущенности, жирной — по числу геомагнитноспокойных дней в месяце. Статистически значимыми здесь оказываются лишь выбросы на первой кривой, соответствующие циклам продолжительностью 19, 23, 53 месяца. Однако не только в статистической надежности каждого в отдельности пика на кривой спектральной плотности надо искать подтверждение

гипотезы о воздействии планет на условия межпланетной среды. Здесь особенно важно то, что из предсказанных 11 циклов в табл. 6 на кривых спектральной плотности прослеживаются 10 из них. Причем четыре пика, как это и можно было ожидать заранее, оказались особенно мощными, они соответствуют циклам продолжительностью 19, 23, 53 и 78 месяцев. Два первых связаны с соединениями трех планет: Меркурия, Венеры и Земли, а два вторых — с соединениями четырех планет: Венеры, Земли, Марса и Юпитера. Синхронизация меж-

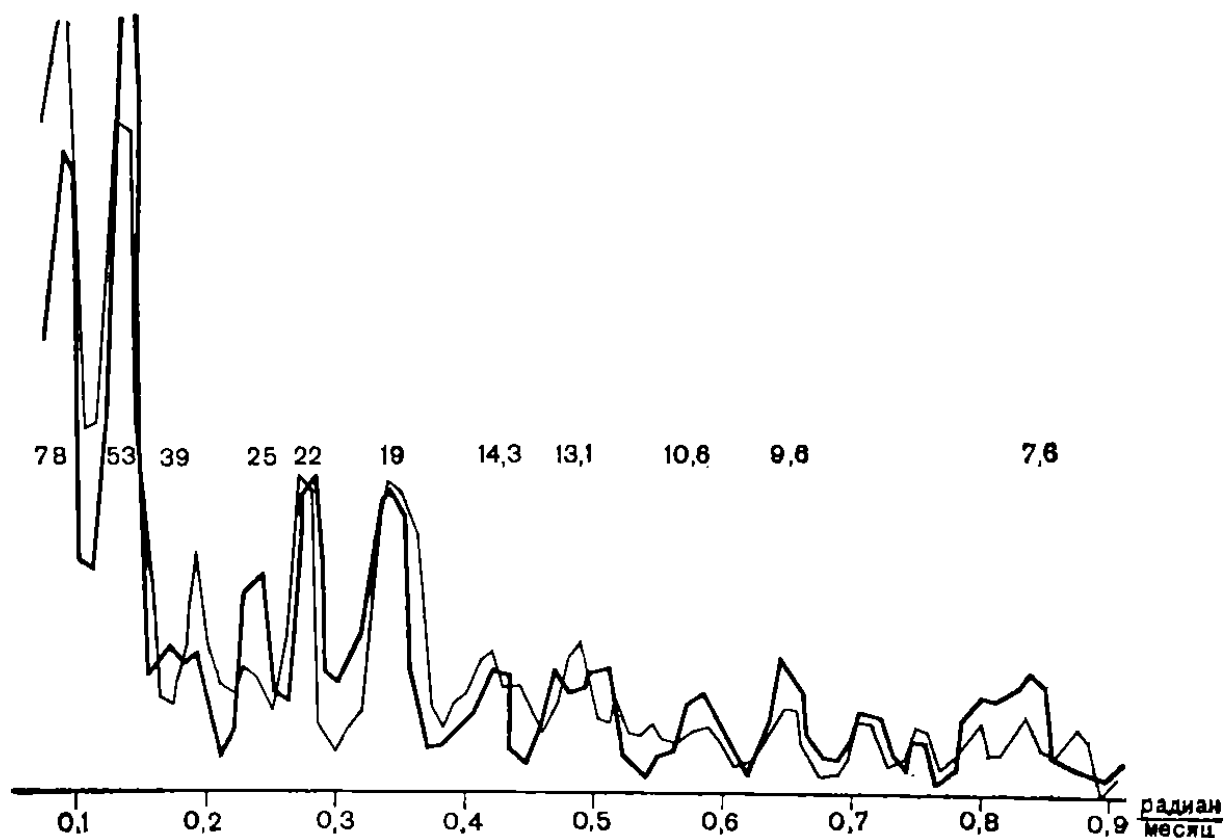


Рис. 9. Спектральные плотности геомагнитной активности

ду периодами парных соединений планет здесь особенно высока. Лишь один из предсказанных в табл. 6 циклов не нашел своего отражения в приведенных спектрах — цикл продолжительностью 39 месяцев (цикл 3,3 года).

С первых лет изучения вариации космических лучей кроме 11-летней вариации было обращено внимание также на двухлетнюю и трехлетнюю вариации космических лучей [71]. В 1965 г. Скрипиным была найдена двухлетняя вариация суточного максимума космических лучей [172]. Особенно четко этот эффект прослеживался на высокоширотных станциях Резолют, Тикси, Якутск, Черчилль. Коэффициент корреляции этого пока-

зателя с индексом геомагнитной активности иногда достигал 0,80. В указанном выше источнике приводятся ссылки на работы, в которых была найдена аналогичная вариация. Двухлетнюю вариацию в интенсивности космических лучей обнаружил и Чирков [203], который в своей работе приводит данные и о наличии четырехлетней вариации космических лучей. Недостаток продолжительных рядов наблюдений не позволяет вести исследования цикличности в космических лучах с достаточной широтой. Однако и имеющиеся данные говорят о наличии в этих рядах двух-, трех- и четырехлетних циклов, природа которых, безусловно, связана с процессами, протекающими в околоземном космическом пространстве.

Значительно более детальную информацию можно получить о цикличности различных метеорологических процессов. Со времен классической работы Шоу [261], детально рассмотревшего этот вопрос, вплоть до настоящих дней циклы двух-, трех-, четырех- и 7-летние постоянно обнаруживаются в самых разнообразных метеорологических характеристиках. Шостакович в своих работах обращал особое внимание на цикл продолжительностью 3,2 года в геофизических показателях [211]. Годсон исследовал около 1250 рядов наблюдений по температуре и ветру в свободной атмосфере и пришел к заключению, что доминирующим в них является период в 26 месяцев. Он также отметил, что следующими по значимости после этого цикла являются циклы продолжительностью 39 и 76 месяцев [59]. В этой связи интересны выводы, полученные Воробьевой, об основных циклах в изменении интенсивности зонального переноса в американской части полушария и над Европой [51]. Как и температура на ряде станций Европейской части Союза, эти показатели имеют три основных цикла, продолжительность которых — 2,3, 3,5 и 7,5 года.

Точность определения продолжительности выделенных циклов в этой работе не важна, но важен сам факт их обнаружения несколькими необычными методами, использованными автором. В обширном исследовании [77] отмечены циклы продолжительностью 2, 3 и 4 года, как весьма значительные по амплитуде в осадках и в различных показателях циркуляции. Авторы установили, что зимой и летом набор основных циклов, определяющих изменение метеорологического режима, различен.

«Временами циклы той или иной длительности исчезают или заменяются циклами несколько иной длительности, а затем появляются вновь» — это замечание весьма характерно потому, что авторы отказываются от мысли о случайном формировании продолжительности циклов, они говорят о вполне закономерном формировании циклов той или иной длительности, о переходе одних циклов в другие. Соединения планет, как было показано, могут «настраиваться» на определенную частоту, которая прослеживается десятки лет. Затем какая-то планета выходит из этого резонанса — цикл исчезнет. Но почти тут же появятся условия для соединения другого набора планет, и другая ритмика установится в притоке космических лучей к Земле. Трудно найти какой-либо другой фактор, чем соединение планет, который смог бы объяснить смену одного набора циклов на другой. Обычно сложные системы имеют характерные частоты колебаний, которые могут либо четко проявляться, либо совершенно отсутствовать.

Исследование очень длительных рядов наблюдений над метеорологическими показателями позволяет с большой точностью установить среднюю продолжительность основных метеорологических циклов. Для метеорологических станций Европы продолжительность наиболее коротких, но обладающих значительной амплитудой циклов оказалась равной 2,2, 3,3 и 4,2 года [256].

Перечень работ, в которых находились подобные циклы, можно было бы при желании увеличить во много раз. Это нетрудно сделать, используя те обширные ссылки на литературу, которые приводятся в упоминавшихся выше работах. Важно отметить здесь, что циклы продолжительностью 26, 39, 53 и 78 месяцев в отдельных случаях очень четко прослеживаются в летних осадках и могут при определенной отработке методики быть использованы для прогнозов. На рис. 10 приводится число мощных ливней, наблюдавшихся в районе центральных черноземных областей за летний период. Мощные ливневые осадки, развивающие овраги и смыывающие почву, наблюдаются в этом районе при развитом восточном типе циркуляции по Вангенгейму—Гирсу. На рисунке приведены средние величины, вычисленные примерно по 30 станциям за каждый сезон. Кроме большой засушливости в период с 1920 по 1924 г., наблюдавшейся в этом районе и совпавшей с засушли-

востью в Поволжье, из рисунка видно, что имеются колебания в числе очень сильных ливней с периодом около 39 месяцев (3,3 года).

В заключение необходимо остановиться на вопросе о влиянии Луны на межпланетную среду, на приток космических лучей к Земле и на течение земных процессов. В таком аспекте, насколько нам известно, этот вопрос не рассматривался, хотя о влиянии положения Луны на течение многочисленных метеорологических процессов написаны многие сотни статей и сообщений. Вообще этот вопрос имеет тысячелетнюю историю.

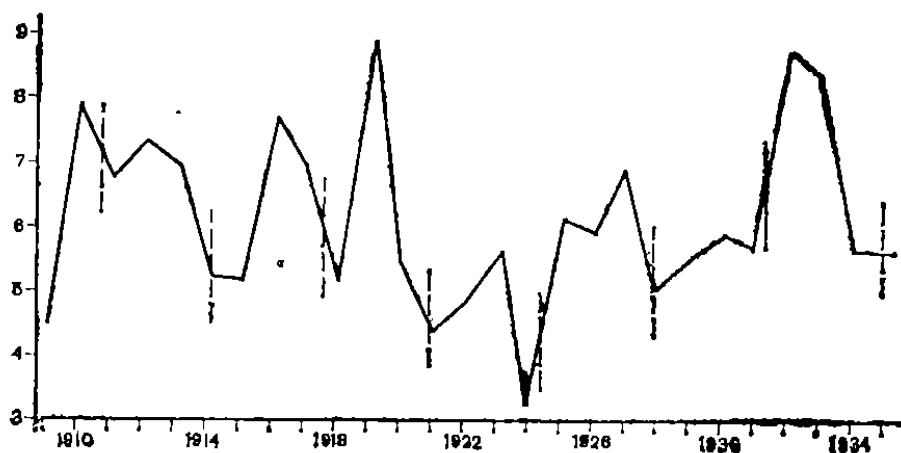


Рис. 10. Число мощных летних ливней в Центральной черноземной области

Имеются указания на то, что жрецы Древнего Вавилона использовали положение фаз Луны для предсказания погоды. Матросы парусных судов с IX по XVIII век считали Луну советчиком в предсказании погоды и накопили в этом смысле сотни всевозможных примет, к сожалению не нашедших никакого научного объяснения и никакой систематизации. Мы отсылаем интересующихся к обстоятельной работе [233], в которой собраны многочисленные факты о влиянии Луны на течение земных процессов; здесь же отметим лишь некоторые моменты, представляющие для нашей задачи особую ценность.

Прежде всего следует обратить внимание на то, что Луна — небесное тело, лишенное упорядоченного магнитного поля и атмосферы, — все же создает значительные возмущения в виде «следа» в межпланетной среде. Об этом говорят многочисленные факты наблюдений за изменчивостью геомагнитной активности, а также пря-

мые измерения напряженности магнитного поля в межпланетной среде, выполненные с космических кораблей [228, 267]. Данные этих наблюдений убедительно свидетельствуют о том, что положение Луны относительно линии Солнце — Земля существенно меняет обстановку в околоземном космическом пространстве.

Только космические лучи способны, прозондировав крупномасштабные возмущения межпланетной среды, перенести эти возмущения на циркулирующую нижних слоев земной атмосферы, только с их помощью можно на базе физических концепций объяснить многочисленные связи Луны и погоды.

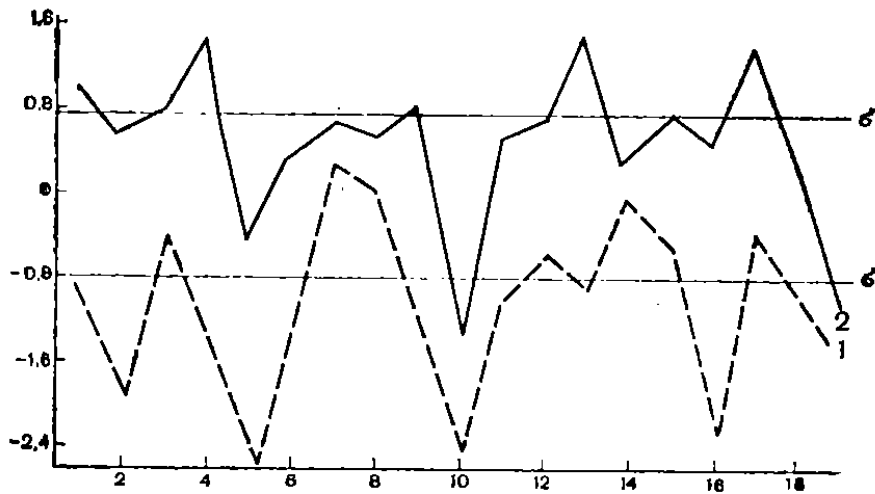


Рис. 11. Кривые хода температур в Ленинграде, вычисленные по годам 18,6-летнего цикла

Имеются два четких периода, связанные с изменением положения Луны в пространстве, продолжительностью 18,6 года и 29,53 дня. Первый связан с движением вокруг Земли точек пересечения лунной орбиты с эклиптической — узловых точек. Второй — синодический цикл — равен времени от одной полной Луны до следующей полной Луны. Поскольку в течение двух-трех дней положение Луны относительно линии Солнце — Земля заметно меняется, более короткий цикл может быть полезен для разработки долгосрочных прогнозов малой заблаговременности или для уточнения кривых хода различных метеорологических показателей в долгосрочном прогнозе, даваемом на несколько месяцев вперед.

Цикл продолжительностью 18,6 года может иметь большое прогностическое значение, хотя он не аппроксимируется синусоидальной кривой и потому почти неизвестен исследователям цикличности. На рис. 11 приводят-

ся две кривые хода температур в Ленинграде, вычисленные по годам 18,6 цикла, заимствованные из работы [182]. Пунктирная кривая — отклонения температуры от нормы в годы, когда Луна находится в перигее над северным или южным полушариями, то есть в наиболее близких к Земле, но наиболее удаленных от эклиптики точках. Оставшиеся годы были также суммированы по годам 18,6 цикла (сплошная жирная кривая). Тонкими прямыми показаны средние квадратические отклонения температуры от нормы. Из рисунка видно, что годы кульминации Луны оказываются значительно холоднее

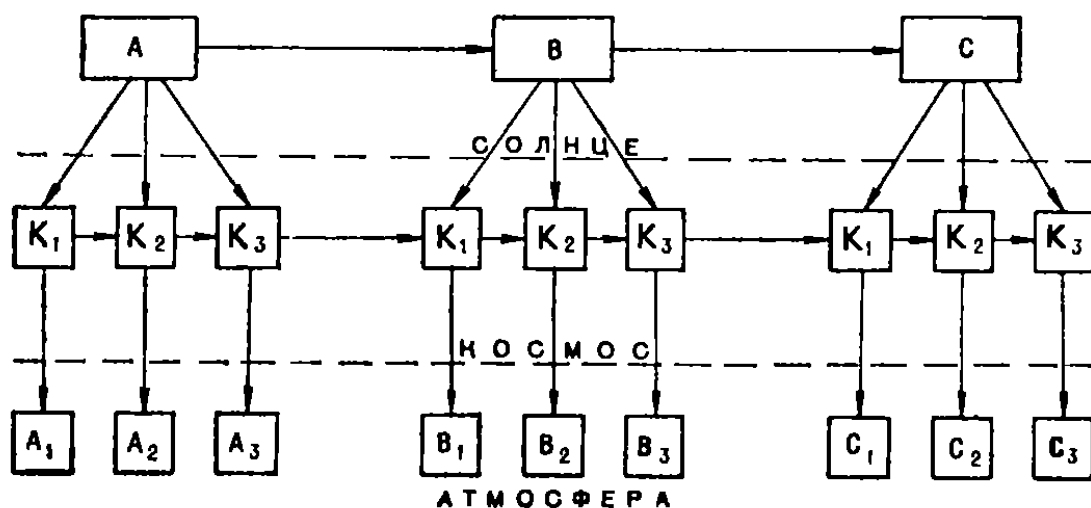


Рис. 12. Схема влияния различных процессов в Космосе на атмосферные процессы

всех остальных лет, и можно утверждать, что на 5, 10 и 16-й годы лунного цикла эти аномальные отклонения от нормы статистически значимы. Вообще автор отмечает по разнообразным характеристикам зим и лет большое сходство в особенностях этого лунного цикла на различных станциях Европы.

Безусловно, вопрос о влиянии Луны на погоду еще не достиг той степени научной разработки, которая позволяла бы учесть и этот фактор в прогнозах погоды уже сегодня. Однако перспективность разработки этого вопроса, как и вопросов о влиянии планет на течение земных процессов, трудно переоценить, учитывая новые данные, которыми сейчас располагает наука. Таким образом, мы подходим к необходимости учитывать не только солнечную активность, но и информацию о положении космических объектов, способных возмущать межпланетную среду. Чтобы понять взаимоотношение между первыми и вторыми, на рис. 12 приводится схема,

где стрелками показано направление влияния одного процесса на другой. Процессы, протекающие на Солнце (А, В и С), определяют ту или иную скорость истечения плазмы, ту или иную напряженность магнитных полей в межпланетной среде. Существуют наборы различных ситуаций в положении небесных тел, способных возмущать межпланетную среду ( $K_1, K_2, K_3$ ). Благодаря сочетанию различных условий на Солнце и в космическом пространстве создаются многообразные условия облучения Земли космическими лучами — создается многообразная картина атмосферной циркуляции. Связи, которые имеются во времени между процессами, протекающими на Солнце, а также между процессами, протекающими в Космосе, могут использоваться для прогноза чередования одних циркуляционных процессов другими. И хотя трудно представить физический механизм связи на Земле между циркулирующей атмосферой весной и ее циркулирующей, скажем, осенью или зимой, мы можем использовать и практически пользуемся такими связями для составления долгосрочных прогнозов. Связи эти ненадежны именно потому, что они справедливы для определенного процесса, протекающего на Солнце, или для процесса А, или В, или С. Если бы уровень солнечной активности оставался постоянным и характеристики межпланетной среды не менялись, то однажды установленные связи могли бы использоваться в прогностических целях бесконечно долго. В таком случае достаточно было бы лишь однажды пронаблюдать воздействие различных планет и Луны на межпланетную среду и на погоду.

Утверждение о том, что без прогноза солнечной активности невозможно учитывать роль космических факторов в прогнозах погоды, тоже, по-видимому, нельзя считать справедливым. Отсутствие точного солнечного прогноза хотя и осложняет дело, но все же не делает бесперспективными попытки, опираясь на геометрию планет, давать прогнозы хода некоторых земных явлений. Наиболее перспективным нам представляется использование и солнечного и космического прогнозов для создания физически обоснованного прогноза земного процесса. На этой базе могут быть созданы и теории долгосрочных прогнозов погоды и ряда земных процессов, если они контролируются притоком космических лучей к Земле.



## Энергетика атмосферных процессов и космические лучи

В настоящем разделе мы рассмотрим вопрос о том, каким образом протоны высоких энергий и, возможно, альфа-частицы воздействуют на циркуляцию земной атмосферы.

Одна из основных задач изучения общей циркуляции атмосферы заключается в том, чтобы найти ответ на вопрос, под действием каких факторов некоторая часть потенциальной энергии атмосферы превращается в кинетическую энергию, в энергию атмосферных движений [29, 124, 255]. Примерно только 1% от энергии, получаемой атмосферой Земли от Солнца, идет на генерацию кинетической энергии [29, 251]. Кинетическая энергия не составляет какой-то постоянной доли от потенциальной энергии атмосферы. Обнаруживается даже обратная связь между потенциальной энергией атмосферы и ее кинетической энергией. Летом, когда потенциальная энергия достигает максимальных значений, кинетическая энергия становится минимальной; зимой картина меняется. На рис. 13 приведены в одних и тех же единицах кривые годового хода потенциальной, внутренней, скрытой и кинетической энергии северного полушария Земли по данным [251]. Хорошо видно, что ход кинетической энергии обратен годовому ходу энергетических запасов атмосферы, которые являются функцией годового лучистого притока к северному полушарию. Аналогичные данные были получены Борисенковым [29].

Многочисленные исследования последних лет [89, 124, 255] показывают, что генерация кинетической энергии может существенно отличаться в двух соседних днях или в двух соседних годах, хотя и приток энергии к Земле, и потенциальная энергия атмосферы были в обоих случаях одинаковыми.

Характер и интенсивность общей циркуляции атмосферы зависят от распределения баланса, который устанавливается между генерацией и диссипацией кинетической энергии [124, 246]. Поскольку условия для диссипации энергии остаются примерно одинаковыми, то и количество диссипирующей энергии в атмосфере определяется главным образом количеством генерируемой энергии. Полная кинетическая энергия всех видов дви-

жений в атмосфере оценивается величиной порядка  $15 \cdot 10^5$  джоуль/м<sup>2</sup>. Составляя сравнительно ничтожную долю от общих энергетических запасов атмосферы (см. рис. 1), она фактически определяет течение всех погодных процессов. По имеющимся многочисленным оценкам, скорость генерации (диссипации) кинетической энергии составляет 4—6 ватт/м<sup>2</sup>. Сравнение этой величины с полной кинетической энергией показывает, что, если бы не происходило постоянного пополнения кинетической энергии, вся энергия атмосферы была бы растрачена за время порядка нескольких суток.

Наибольшие запасы кинетической энергии сосредоточены в субтропической зоне [89, 124, 206], наибольшая генерация и диссипация кинетической энергии также происходит в этой зоне. Из субтропической зоны часть кинетической энергии выносится в умеренные и полярные широты [239]. Кроме того, кинетическая энергия выносится западно-восточным переносом из высотных ложбин в другие области [246, 255].

Особый интерес для метеорологов представляет исследование меридиональных составляющих циркуляции, которые, хотя и слабее на порядок и более зональных составляющих, но определяют изменения характера общей циркуляции атмосферы, изменение погодных условий. Строго зональная циркуляция, сохраняющаяся в течение всего года, несмотря на ее громадные энергии, не обеспечивает резких изменений метеорологических параметров. Таким образом, поток энергии, идущей на создание погодообразующей меридиональной циркуляции в атмосфере, оказывается на два порядка меньше общего потока энергии, необходимой для поддержания общей кинетической энергии атмосферы. Холопай-

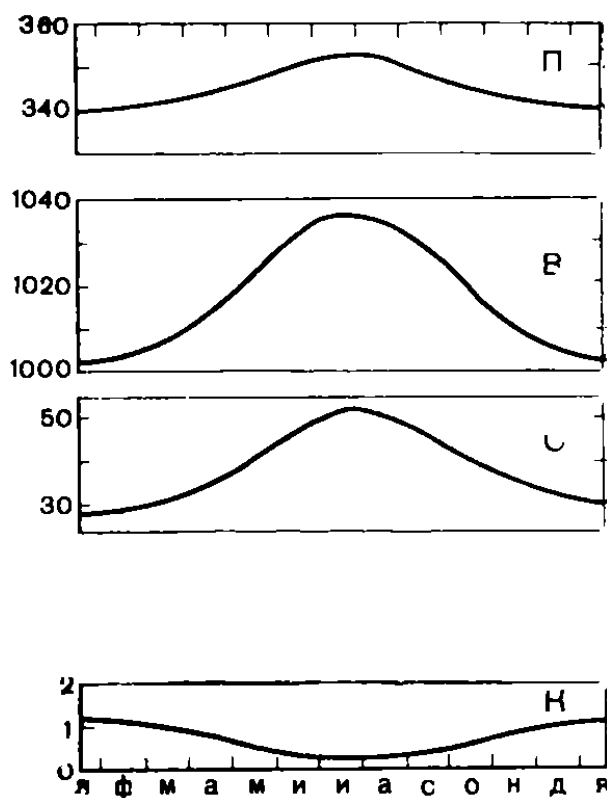


Рис. 13. Изменения годового хода различных типов энергии в северном полушарии Земли

нен [240] впервые обратил внимание на незначительность этой величины. По его оценкам, поток энергии, идущей на поддержание меридиональной циркуляции, равен всего  $10^{-2}$  ватт/м<sup>2</sup>.

И энергия для создания зональной циркуляции в верхней тропосфере (около 1 ватт/м<sup>2</sup>), и энергия для создания меридиональной циркуляции в верхней тропосфере (около  $10^{-2}$  ватт/м<sup>2</sup>) черпается из потенциальной энергии атмосферы. Постоянно то в одном, то в другом районе частицы воздуха приобретают кинетическую энергию.

Чтобы возросла кинетическая энергия частицы воздуха, она должна принять участие в каком-то нисходящем движении и потерять часть своей потенциальной энергии, подобно тому как грузик маятника приобретает кинетическую энергию, двигаясь к нижней точке своей дугообразной траектории. И в теоретических [261] и в экспериментальных работах показано, что только при появлении агеострофических составляющих ветра происходит генерация кинетической энергии в атмосфере Земли [246].

Существуют большие трудности в объяснении природы агеострофических составляющих ветра и генерации кинетической энергии именно в верхней тропосфере, где формируются макромасштабные особенности общей циркуляции атмосферы. Если в слое нижней тропосферы толщиной около двух километров появление агеострофических составляющих ветра объяснимо воздействием подстилающей поверхности на поток и скорость генерации сбалансирована скоростью диссипации энергии и не меняется существенно от одного периода к другому, то в верхней тропосфере (в слое 8—12 км) уровень генерации кинетической энергии испытывает большие и пока не объяснимые изменения [89, 244]. Даже в течение одного месяца величина генерируемой кинетической энергии может меняться в несколько раз в одном и том же районе.

И для генерации кинетической энергии зонального ветра, и для генерации кинетической энергии меридиональных движений необходимо появление соответствующих агеострофических составляющих ветра. Предпринимались неоднократные попытки получить величину этих составляющих исходя из существующего поля скоростей. Этот путь оказался бесперспективным по

двум обстоятельствам: существующее поле ветра — это результат работы источников кинетической энергии в предшествующий период времени. Если же использовать существующее поле ветра, то можно получить лишь эволюцию все того же поля ветра, но не его преобразование. Понимание природы агеострофических составляющих в верхней тропосфере будет решающим шагом в познании законов общей циркуляции атмосферы и процессов погодообразования.

В последние годы исследована разница направлений и скорости реального (наблюденного) ветра с ветром, вычисленным на основании высотного распределения давления в районах с густой сетью аэрологических станций. Наибольшие расхождения наблюдаются на высотах 200—300 мб поверхностей, где различия в скорости ветра достигают 30—40% и становятся тем больше, чем больше величины реальных наблюдаемых ветров [243, 244]. Этот факт хорошо увязывается с результатами изучения генерации кинетической энергии в верхней атмосфере. Э. Кляйншмидт [245] отметил чрезвычайно важное обстоятельство: в средней тропосфере отклонение реального ветра от геострофического невелико и носит случайный характер, так что, по-видимому, это различие обусловлено ошибками наблюдений давления и ветра. В верхней же тропосфере отклонение ветра от геострофического достаточно велико и упорядоченно. На больших площадях периодически появляется агеострофический ветер одного и того же направления, и необходимо искать какие-то причины этого явления.

На рис. 14 приводится широтно-высотный разрез генерации кинетической энергии за зимний период над Северной Америкой, заимствованный из [246]. Обращает на себя внимание наличие двух центров максимальной генерации кинетической энергии на широтах около 25° и 37°; эти области совпадают с наибольшими отклонениями ветра от геострофического. Но самое интересное заключается в том, что области генерации кинетической энергии жестко ограничены сверху и снизу и как бы закреплены над субтропическими широтами.

Если на создание меридиональной составляющей циркуляции требуется поток энергии  $10^{-2}$  ватт/м<sup>2</sup>, то на создание агеострофической составляющей поток энергии на порядок-два меньше, то есть  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  ватт/м<sup>2</sup>.

Приведенные оценки, конечно, нуждаются в уточнении. До сих пор, к сожалению, не были проведены исследования энергетики агеострофических составляющих ветра в верхней тропосфере, что связано с определенными техническими и вычислительными трудностями. Вместе с тем приведенные оценки порядка величин энергии, необходимой для перестройки меридиональной циркуляции атмосферы, поражают своей небольшой величиной по сравнению с теми величинами, которыми обычно оперируют в метеорологии и которые соизмеримы с лучистыми притоками энергии в атмосферу Земли,

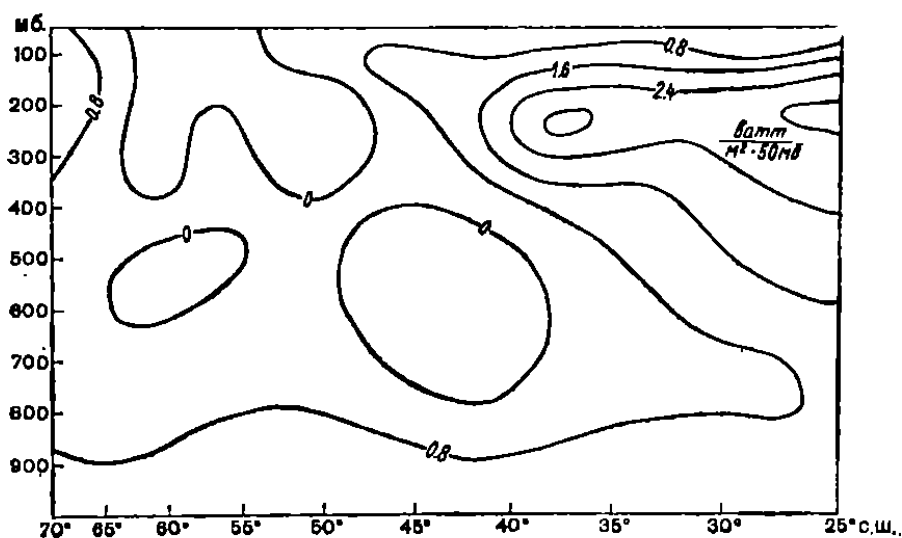


Рис. 14. Схема генерации кинетической энергии в зимний период над Северной Америкой

равными примерно  $10^3$  ватт/м<sup>2</sup>. Энергетика процессов, управляющих погодой, на семь порядков меньше энергетики процессов, обеспечивающих сохранение теплового режима газовой оболочки Земли, она сравнима с выработкой энергии человеком. Вырабатываемая людьми энергия излучается в атмосферу, но атмосфера имеет необычайно низкий коэффициент полезного действия: около 1% для генерации зональной кинетической энергии, как отмечалось выше, и около  $10^{-2}$ % для генерации меридиональной циркуляции. Положение коренным образом изменилось, если бы вырабатываемая людьми энергия могла быть передана непосредственно частицами воздуха для создания некоторого упорядоченного движения в атмосфере. При обсуждении возможностей воздействия человека на крупномасштабные циркуляционные процессы было отмечено, что воздействие неболь-

ших энергий, приложенных к горизонтальным и вертикальным скоростям длительное время, гораздо эффективнее громадных тепловых затрат [215].

Человек не располагает сейчас реальными возможностями, чтобы доступную энергию эффективно перевести в кинетическую энергию движущегося газа. Различного рода вентиляторы, аэродинамические трубы и т. п. — малоэффективные и дорогостоящие устройства. Однако в природе существует один очень эффективный механизм создания упорядоченного движения в газе, в котором почти вся имеющаяся энергия может быть передана газу. Этот механизм осуществляется при прохождении упорядоченного потока высокоэнергичных частиц через холодный газ. Благодаря упругим и квазиупругим соударениям почти вся энергия высокоэнергичных частиц может быть рассеяна на частицах газа, в котором появятся упорядоченные движения. На этом принципе основана работа водоструйных и пароструйных насосов. Когда из ускорителя протонов или других высокоэнергичных частиц поток выводят в газовую мишень, в ней возникает циркуляция газа.

В атмосферу Земли постоянно вторгается поток высокоэнергичных частиц, генерированных в недрах Галактики и на поверхности Солнца. С ростом энергии, особенно в области энергий  $10^9$  эв и выше, заряженные частицы теряют большую долю энергии в неупругих соударениях с частицами, однако со временем частица уменьшает свою энергию, затормаживается и, оказавшись вне указанного интервала, оставшуюся энергию тратит в упругих и квазиупругих ядерных соударениях. На рис. 15 приводятся сечения упругих и неупругих взаимодействий протона с протоном [40] в зависимости от энергии налетающего протона.

В метеорологической науке около 40 лет назад установилось мнение, что космические лучи представляют собой совершенно ничтожный источник энергии для земной атмосферы, который сравним с лучистой энергией, приходящей от звезд, или с энергией, идущей из недр Земли [165]. Когда складывалось убеждение, что космические лучи никак не влияют на циркуляцию атмосферы, ни об энергетике космических лучей, ни об энергетике атмосферы ничего не было известно. Неточность некоторых ученых, пытавшихся оценивать значение разных притоков энергии к атмосфере Земли, заключа-

ется в том, что энергию, вносимую космическими лучами, они рассматривали с тех же позиций, что и все остальные потоки лучистой энергии, входящие в атмосферу. Этого делать, по-видимому, нельзя по той причине, что всякий поток лучистой энергии неизбежно должен быть вовлечен в малоэффективный цикл тепловой машины, в то время как протоны высокой энергии могут непосредственно усилить или ослабить «управляющий» механизм погодообразования — агеострофические составляющие меридиональной составляющей.

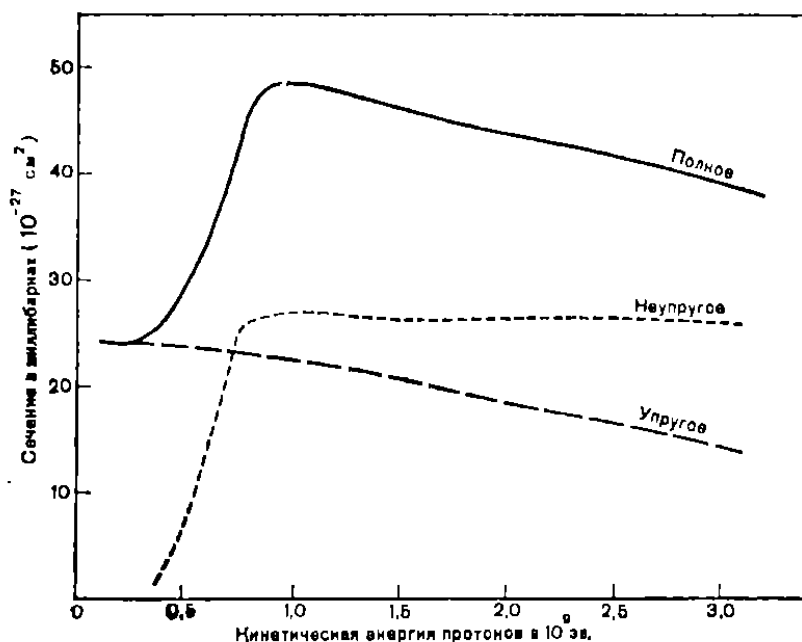


Рис. 15. Взаимодействие протонов различных энергий

В результате интенсивных исследований космического пространства выяснилось, что в атмосферу Земли вторгаются протоны, альфа-частицы и ядра более тяжелых атомов и что даже малые вспышки на Солнце постоянно добавляют в поток частиц галактического происхождения частицы солнечного происхождения [166]. На рис. 16 приводятся последние данные о спектрах заряженных частиц, вторгающихся в атмосферу. С учетом этих данных осредненный во времени поток энергии, притекающий из Космоса к магнитосфере Земли, можно оценить величиной порядка  $10^{-2}$  эрг. см<sup>-2</sup>. сек<sup>-1</sup>, или  $10^{-5}$  ватт/м<sup>2</sup>.

Изменяющаяся конфигурация магнитных полей в околоземном Космосе, меняющийся уровень хромосферной активности Солнца могут приводить к тому, что прино-

симая к Земле энергия может либо возрастать, либо убывать в несколько раз. Нас интересуют те ситуации, когда приносимая энергия возрастает, и потому для грубой оценки мы примем величину  $3 \cdot 10^{-5}$  ватт/м<sup>2</sup> для протонов в диапазоне энергий  $3 \cdot 10^8$ — $10^9$  эв. Мы обращаем внимание на протоны этой энергии по ряду обстоятельств:

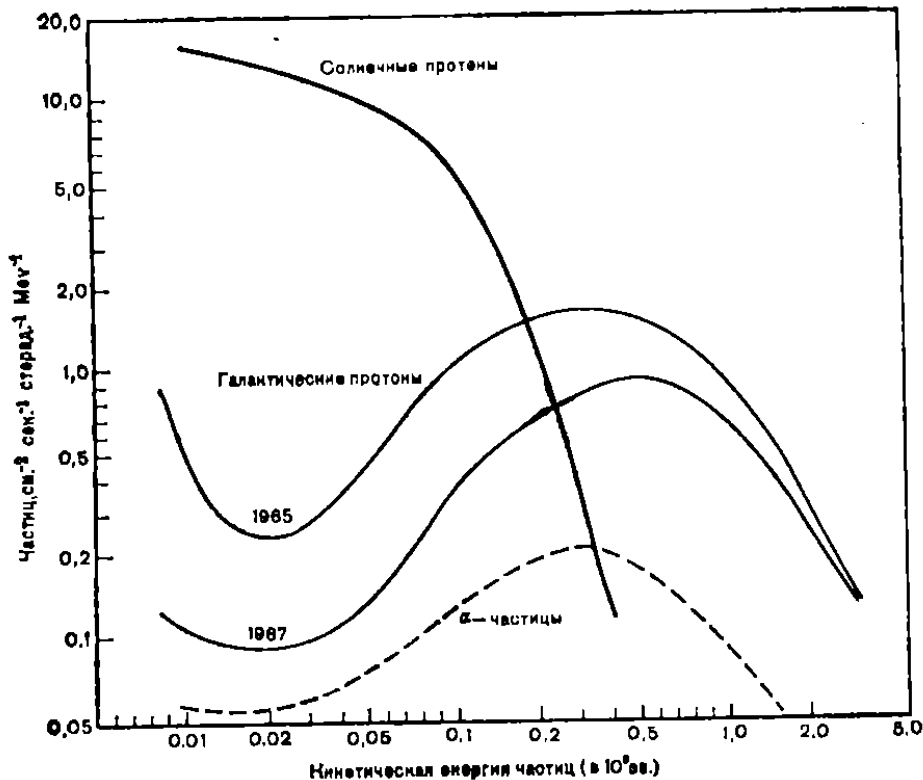


Рис. 16. Спектры заряженных частиц, вторгающихся в атмосферу Земли

а) энергия этих протонов поглощается в тонком слое верхней тропосферы, б) протоны этой энергии основную долю энергии расходуют на упругие и квазиупругие взаимодействия с частицами воздуха, в) протоны этой энергии эффективно взаимодействуют с магнитными полями Космоса, а также с магнитным полем Земли, г) протоны этой энергии несут значительную долю энергии всех высокоэнергичных частиц в Космосе.

Все вариации потоков протонов в космическом пространстве за суточный интервал не имели бы существенного значения для циркуляции атмосферы, поскольку поток энергии едва ли бы мог быть больше  $10^{-5}$  ватт/м<sup>2</sup>. Земля обладает мощным магнитным полем, строение которого таково, что оно способно фокусировать заряженные частицы, попадающие в сферу его воздействия.



Сфера, которая захватывает протоны указанных выше энергий, имеет радиус в 2—3 раза больше радиуса Земли [173]. Изотропный поток протонов может захватываться поверхностью магнитосферы, равной  $10^{20}$  см<sup>2</sup>. Упорядоченный земным магнитным полем поток протонов может покинуть магнитосферу в области мировой магнитной аномалии, размеры которой обычно занимают площадь от  $10^{17}$  до  $10^{18}$  см<sup>2</sup>. Таким образом, после прохождения магнитосферы поток протонов может оказаться уплотненным в сотни раз. В атмосферу Земли в отдельных благоприятных районах в отдельные благоприятные периоды может, по-видимому, вноситься заряженными частицами энергии до  $3 \cdot 10^{-4}$  ватт/м<sup>2</sup>. Конечно, часть этой энергии будет потеряна на неупругие соударения, часть будет рассеяна в неупорядоченных движениях, однако сам факт сходства порядков энергий заставляет пересмотреть отношение к космическим лучам. Протоны высокой энергии могут стимулировать перевод потенциальной энергии в кинетическую энергию меридиональной циркуляции, способствуя созданию агеострофических составляющих ветра.

Рассмотрим один из примеров достаточно интенсивной генерации кинетической энергии в тропосфере и стратосфере в январе 1963 г. В этот период произошло одно из самых грандиозных внезапных повышений температуры в стратосфере. Во второй и третьей декадах января произошло резкое повышение запятненности Солнца. В табл. 7 приводятся средние декадные значения запятненности Солнца в широтной зоне от 0° до 15° северной гелиошироты. Эта зона наиболее четко конт-

Таблица 7

Площадь пятен  
в центральной зоне Солнца  
в миллионных долях полусферы Солнца  
(средняя за декаду)

Декабрь 1962 г.			Январь 1963 г.			Февраль 1963 г.		
I	II	III	I	II	III	I	II	III
88	53	99	18	342	205	1	2	6

ролирует процессы в околоземном Космосе за счет определенного наклона силовых линий космических магнитных полей. 15 и 26 января через центральный меридиан Солнца проходили два больших пятна. 14 января началась магнитная буря, было зарегистрировано возмущение магнитосферы, возросла интенсивность потока частиц в радиационных поясах и потоков, направленных в атмосферу Земли [242].

Использование протонов высокой энергии в качестве стимулятора генерации кинетической энергии в атмосфере объясняет:

а) высоту генерации кинетической энергии в верхней тропосфере — протоны высокой энергии поглощаются на тех же высотах, где генерируется кинетическая энергия,

б) широту преимущественной генерации кинетической энергии — протоны указанной энергии упорядоченно входят в атмосферу Земли лишь в субтропических и умеренных широтах,

в) изменчивость временного хода генерации кинетической энергии — поток протонов высокой энергии испытывает также большие временные изменения,

г) независимость уровня генерации кинетической энергии от потенциальной энергии атмосферы,

д) тот факт, что район Великих озер на Северо-Американском континенте является мощным источником кинетической энергии атмосферы в северном полушарии [246], что объясняется повышенным притоком протонов высокой энергии в районе Северо-Американской магнитной аномалии.

Подводя итог сказанному выше, можно отметить следующее:

1. Существенные для изменения характера общей циркуляции атмосферы процессы требуют подведения в общем небольшой энергии, около  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  ватт/м<sup>2</sup>, что на много порядков меньше потоков лучистой энергии, получаемой Землей от Солнца.

2. Протоны высоких энергий в отдельные периоды в отдельных районах могут, по-видимому, вносить такую энергию, и она почти целиком может пойти на создание горизонтальных ветров в верхней тропосфере. Энергия высокоэнергичных частиц в атмосфере Земли уникальна: минуя малоэффективный цикл тепловой машины, она может прямо переходить в кинетическую энергию

воздушных масс и создавать ветер, не связанный с барическим полем верхней тропосферы.

3. Если протоны высокой энергии изменяют характер и интенсивность течения земных процессов, тогда ценную для долгосрочного прогноза информацию следует искать в характеристиках активности Солнца и межпланетной среды.

4. Все факторы, которые контролируют строение и особенности межпланетных магнитных полей (хромосферные вспышки, планеты, метеорные потоки и пр.) и через них контролируют приток космических лучей к Земле, должны приниматься в расчет для прогнозирования хода земных явлений. Процессы космического пространства, таким образом, могут явиться источником ценной для прогнозирования земных процессов информации, которую не в состоянии заменить данные о текущем земном процессе или записи о его прошлых изменениях.

### **Космические факторы и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы**

Многочисленные сведения об использовании космических и геофизических факторов для долгосрочных гидрометеорологических прогнозов имеются в книгах М. С. Эйгенсона, А. Н. Афанасьева, Т. В. Покровской, А. А. Гирса, К. И. Смирновой, И. В. Максимова, О. Д. Дроздова и А. С. Григорьевой, Э. И. Саруханяна и Н. П. Смирнова, Б. И. Сазонова и В. Ф. Логинова, в статьях О. А. Дроздова и Т. В. Покровской, Б. Л. Дзердзеевского и А. С. Чаплыгиной, Р. Д. Кудрина, в трудах I Всесоюзного совещания «Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды» (1973 г.) и многих других публикациях.

Рассмотрим наиболее часто используемые для прогностических целей характеристики нескольких космических и общепланетарных геофизических процессов (рис. 17). Первый из них — долгопериодная составляющая приливных сил системы Солнце — Земля — Луна — изучен настолько, что надежно прогнозируется на неопределенную перспективу. Это весьма четкий циклический со средней продолжительностью цикла 19(18,6) лет,

но не строго периодический процесс. На рис. 17 он показан до 2000 г. Второй — солнечная активность — представлен наиболее известными показателями — относительными числами солнечных пятен (числа Вольфа, цюрихские данные). Приведенный отрезок временного ряда иллюстрирует известные 11-летние (в среднем) циклы, а также отдельные части ветвей вековых циклов.

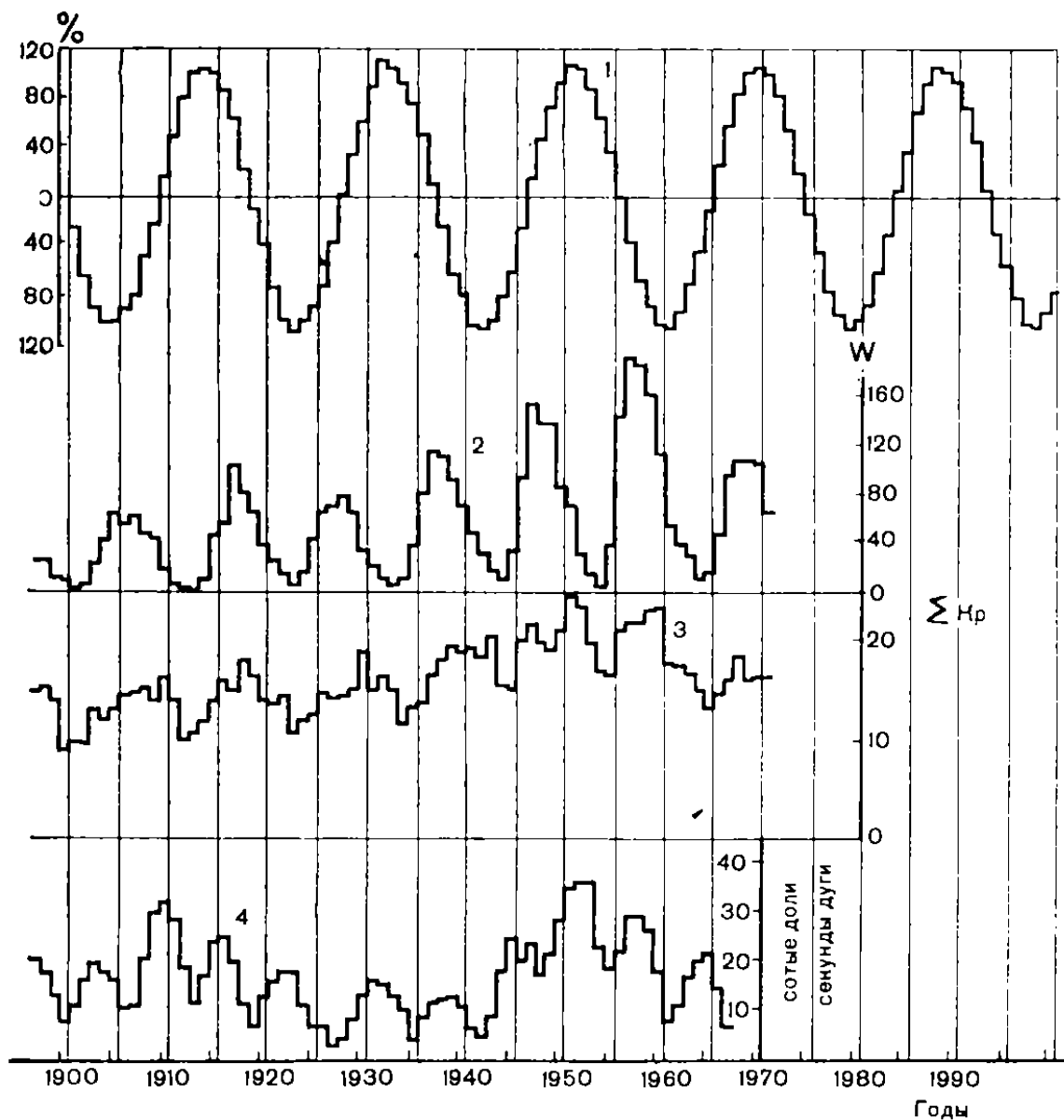


Рис. 17. Колебания некоторых природных процессов:

1 — приливообразующие силы на широтах больше 35—40° (по В. Н. Воробьеву); 2 — числа Вольфа; 3 — геомагнитный индекс  $\Sigma K_p$ ; 4 — радиус вращения Северного полюса (по А. Я. Орлову)

Колебания одного из показателей магнитного поля (рис. 17, кривая 3) довольно неплохо согласуются с солнечной активностью в вековом цикле, но имеют достаточно существенные расхождения (особенно во времени наступления максимумов циклов) в 11-летних цик-

лах, хотя в общем и эти циклы вполне определены [143]. Разработка методов прогнозов этого и других показателей земного магнитного поля не имеет столь длинной истории, как прогнозирование приливообразующих сил и солнечной активности, и по сути дела только начинается. Следует отметить, что в последние годы стремительно нарастает поток исследований связей геомагнитных индексов с метеорологическими элементами (в особенности засухами), и целесообразность прогнозирования этих индексов не вызывает сомнений.

Изменение радиуса вращения мгновенного полюса Земли (относительно его среднего положения) также является упорядоченным циклическим процессом (рис. 17, кривая 4) с циклами 6—7 и около 40 лет. Этот процесс пока изучен недостаточно. Чаще всего 6—7-летняя цикличность объясняется «биениями», возникающими в результате сложения двух колебаний: вынужденного годового (с 12-месячным периодом) и свободных колебаний Земли с 14-месячным периодом (Чандлеров период). Но имеются и другие объяснения. Некоторые авторы считают, что свободные колебания Земли могут поддерживаться нерегулярными возмущениями, а другие в качестве наиболее вероятной причины колебаний полюсов называют нерегулярные вариации атмосферы. Прогнозирование этого процесса как в части 6—7-летней, так и 40-летней составляющих пока весьма проблематично.

Кроме названных возможно влияние и других причин и факторов (см. выше, а также изменения скорости вращения Земли и др.) на колебания метеорологических и гидрологических элементов, но все эти вопросы еще слабо изучены, и в настоящем разделе мы их не будем затрагивать. Рассмотрим несколько более подробно каждую из названных четырех характеристик.

Приливные силы относятся к числу космических факторов. Они характеризуются весьма разнообразными ритмами. Мы обращаем внимание пока лишь на 17—22-летний цикл (в среднем около 19 лет). Как показали многочисленные исследования, такие циклы обнаруживаются и в колебаниях гидрометеорологических элементов. При этом часто они имеют весьма заметную амплитуду. Например, предположительно обусловленные этой составляющей колебания температуры воды в Северной Атлантике имеют амплитуду, равную, по данным [129],

21% от «абсолютной» (половина общего размаха колебаний каждого ряда натуральных данных). О влиянии приливных сил на солнечную активность говорилось выше. Их следует рассматривать как постоянно действующие слабые силы. И заранее пренебрегать ими при разработке методов сверхдолгосрочных прогнозов гидрометеорологических элементов было бы неразумно, хотя вполне может оказаться, что в одних случаях они будут высоко значимыми, а в других практически незаметными.

Относительно возможного влияния 11-летних циклов солнечной активности на климат и другие природные процессы на Земле имеется огромное число различных мнений, но окончательного решения проблемы еще нет. Однако можно отметить, что в ряде случаев 10—11-летние колебания, предположительно солнечного происхождения, выявляются довольно четко и имеют весьма существенную амплитуду. Например, для рек Средней Азии и Южного Казахстана она находится в пределах от 12 до 48% от «абсолютной амплитуды», а на Неве, Унже, Вятке, Зее — 18—34% от «абсолютной». В последнее время получены оценки согласованности (когерентности) хода 10—11-летних составляющих колебаний атмосферной циркуляции и стока рек с 10—11-летними циклами солнечной активности [107].

Кроме того, недавно выявлена и статистически оценена связь наиболее резких изменений солнечной активности в эпохах ее повышения или понижения и переломов многолетнего хода стока рек и других природных процессов на Земле [80], с учетом которой приходится делать предположение о том, что солнечная активность может создавать по меньшей мере двойные эффекты: «циклический фон» изменений земных процессов и часть переломов многолетнего хода, искажающих этот «циклический фон». Для различных процессов, районов земного шара и отрезков времени соотношение между «циклическим фоном» и результатами воздействия резких изменений солнечной активности различно. Общий итог их совместного влияния также может быть неодинаковым. Поэтому нельзя считать правильным, когда говорят, что если есть влияние солнечной активности (например, на речной сток), то оно должно быть практически одинаковым во всех районах и во все времена. Нельзя отрицать при этом и возможности изменений

запаздывания земных проявлений солнечной активности. Реальные солнечно-земные связи, видимо, значительно сложнее, чем могут показаться на первый взгляд.

Большое влияние на земные процессы в ряде случаев оказывает «вековой цикл» солнечной активности со средним периодом 80—90 лет. Амплитуды вековой вариации солнечной активности велики, а связанные с ними колебания различных показателей циркуляции, климата и ледовитости полярных морей, по имеющимся сведениям, обуславливают около 40% «абсолютной амплитуды» [129]. Однако вековые циклы не относятся к универсальным и повсеместно распространенным свойствам временной изменчивости гидрометеорологических элементов. Как уже показано [79], имеются большие по территории районы, в которых вековые циклы стока рек проявляются весьма слабо или даже отсутствуют, хотя в других (соседних) районах они весьма четкие и значимые.

6—7-летние изменения положения мгновенного полюса вращения Земли создают так называемый полюсный прилив и могут быть причиной аналогичной ритмичности в многолетних изменениях деятельности известного океанического течения Гольфстрим, которая через атмосферную циркуляцию может отобразиться в колебаниях климата и стока рек в отдельных районах Земли [129]. Как показали расчеты, циклы продолжительностью 6—8 лет почти повсеместно (80—88% случаев) наблюдаются и в колебаниях стока рек СССР, хотя степень их проявления различна. Их амплитуды оказываются в ряде случаев весьма существенными. Например, 6-летние гармоники стоковых рядов Северной Двины, Свири, Унжи достигают 22—30% от «абсолютной амплитуды». На Неве, Волге у Кинешмы, Амуре, Енисее полезной (с учетом потерь) приточности в озеро Байкал амплитуды 6—7-летних гармоник составляют 16—18% от «абсолютной». Следует также отметить и 40-летний цикл колебаний радиуса вращения полюсов, большое климатообразующее влияние которого основательно изучается в последние годы М. Х. Байдалом (см., например, труды КазНИГМИ, вып. 44, 1972).

Кроме названных, весьма четко и, видимо, значительно чаще обнаруживаются относительно малые циклы: 2—3, 3—4, 4—5-летние, природа которых сейчас изучена еще недостаточно (см. выше), хотя так называемый

двухлетний или сверхдвухлетний цикл (26—28 месяцев) вызывает в последние 15—20 лет очень большой интерес [153].

Как показал анализ многолетних колебаний атмосферной циркуляции и гидрометеорологических элементов, проведенный многими авторами, эти колебания представляются в настоящее время состоящими из нескольких относительно самостоятельных циклических (и нециклических) составляющих. По данным С. Г. Агаркова, две — четыре циклические составляющие обычно оказываются наиболее значимы и вместе определяют 60—80% общей амплитуды колебаний стока рек (в Западной Сибири и Казахстане). Поэтому их дальнейшее изучение, в особенности установление природы каждой из них, представляет большой научный и практический интерес, в первую очередь с точки зрения сверхдолгосрочного прогноза. То же самое можно сказать и об исследованиях нециклических (в том числе и случайных) составляющих.

Приведенные данные и оценки показывают некоторые из потенциально возможных источников информации для прогнозирования. Однако при этом всегда следует иметь в виду, что ни один из названных космогеофизических процессов не обладает строго периодическими изменениями, а их влияния на земные процессы проявляются одновременно, накладываясь друг на друга. Кроме того, возможно влияние других, не известных пока факторов различного происхождения, в результате чего получается чрезвычайно сложная ситуация, с которой обычно и приходится иметь дело. В этих условиях наиболее перспективными, видимо, будут такие методы предсказания, которые позволят использовать многие источники любой полезной информации (в том числе и данные о процессах с существенными случайными составляющими), а результаты будут представлены в виде кривой распределения условных вероятностей хода прогнозируемого процесса.

В настоящее время имеются попытки разработки методов долгосрочных прогнозов. Чаще других предлагается экстраполировать ход процесса на основе характеристик (вероятностных, детерминированных), выявленных по прошлым наблюдениям [6 и др.]. Эти приемы дают удовлетворительные результаты примерно в половине случаев и при относительно малой заблаговремен-



ности, видимо, главным образом потому, что не учитываются многие действующие факторы.

Существенным и интересным, на наш взгляд, является так называемый генетический метод, в котором основанием для прогноза многолетних колебаний гидрометеорологических элементов является заранее изученная связь между силой, возбуждающей данное колебание, и полученными из наблюдений характеристиками самого колебания [129]. При этом первоначально прогнозируются вариации силы (солнечная активность, так называемые «силы деформации» и др.), и на их основе дается прогноз хода климатических и иных характеристик. Например, для прогноза температуры морских вод у Фарерских и Шетландских островов в качестве предсказателей [127, стр. 377] использованы индексы приливных сил (нутационного или полюсного долгопериодного приливов) и аномалий хода солнечной активности в 11-летнем и вековом циклах. Для прогноза стока реки Волги у Куйбышева [167] взята вековая, 2-летняя, 7-летняя, 11-летняя, 15-летняя и 19-летняя составляющие. Одним из недостатков этого метода, по нашему мнению, является то, что в нем в полной мере, видимо, все же не удается учесть явление совместности действия названных сил в каждой частной ситуации (оно учитывается в излишне осредненном виде). Кроме того, не учитывается случайная составляющая колебаний, а результаты не представлены в виде условных вероятностей хода прогнозируемого процесса. Однако сам факт разработки такого метода, использующего многие источники информации, может расцениваться как существенное продвижение в изучении целого ряда сложных процессов и их взаимных связей.

Из числа других попыток решения поставленной задачи следует отметить использование специальной обучающейся информационной системы [117]. Эта система позволяет учесть при прогнозе влияние большого числа факторов, самую разнообразную информацию и получить решение в виде кривой распределения условных вероятностей ожидаемых показателей процесса в рассматриваемый интервал времени. Сама работа поставлена в плане выяснения возможностей подбора такого комплекса предсказателей, который позволил бы получить удовлетворительные прогнозы речного стока с заблаговременностью не менее года. При этом большин-

ство предсказателей берется без их прогноза (кроме приливообразующих сил) со сдвигом назад, что определяет и возможность прогноза, и его заблаговременность. В результате оказалось, что к наиболее важным предсказателям относятся: предыстория прогнозируемого процесса, отдельные (в разных районах разные) группы атмосферной циркуляции по Б. Л. Дзерdzeевскому, солнечная активность, приливные силы. Такой набор предсказателей, видимо, является вполне логичным, так как атмосферная циркуляция является одним из главных звеньев, определяющих колебания стока рек. К тому же характеристики циркуляции уже содержат в себе естественным образом трансформированные атмосферой влияния космических и геофизических факторов. Проверка этой методики на десяти крупных реках СССР, расположенных в различных районах Сибири, Средней Азии и Европейской части, дала весьма обнадеживающие результаты: заблаговременность — от 1 до 5 лет, обеспеченность метода при допустимой (вероятной) ошибке — в среднем 82%, превышение ее над природной обеспеченностью — в среднем 25%, более половины неоправдавшихся прогнозов дадут ошибки не выше среднеквадратичного отклонения, еще половина оставшихся несколько превышают его, но остальные (4—5% прогнозов) имеют весьма крупные ошибки (до двух-трех среднеквадратических отклонений).

Применение обучающихся информационных систем для прогнозных целей представляется весьма перспективным, так как эти системы уже сегодня обладают хорошими возможностями обработки большого объема информации и ее эффективного использования, в том числе и с учетом частных ситуаций, складывающихся в реальных условиях.

Одним из важнейших принципиальных результатов этой работы является экспериментальное подтверждение необходимости привлечения внешних (по отношению к речному стоку) источников информации при сверхдолгосрочном прогнозировании.

Это положение может быть проиллюстрировано и на более простых примерах.

До настоящего времени оценка колебаний речного стока в будущем ведется на основании нескольких математических моделей этого процесса. Наиболее простой из них является модель в виде последовательности не-

зависимых случайных величин. Несколько сложнее ее модель в виде простой цепи Маркова, а еще более сложной и совершенной является сложная цепь Маркова. Эти модели, кроме первой, основываются на внутрирядных связях (внутрирядной корреляции). Однако, как уже показано [79], они малоперспективны в плане использования для прогнозных целей, что практически полностью согласуется с мнением [112] о том, что на основе внутрирядной корреляции стока смежных или соседних лет можно сделать некоторые оценки относительно водности ближайшего предстоящего периода, но «практически эти связи столь не тесны, что использование их для прогноза, по-видимому, малоэффективно».

Полученный вывод очень важен, так как подтверждает настоятельную необходимость изыскания дополнительных возможностей для создания методов предсказания многолетних колебаний речного стока.

В этом направлении использованы далеко не все возможности. Многие из них станут вполне реальными, когда появятся приемы, базирующиеся на сочетании известных схем и построений с привлечением новой информации. Например, на рис. 18 показана связь стока смежных лет реки Дон у города Калача. Если взять все поле точек, как это обычно делается при использовании автокорреляционных связей, то рассеяние настолько велико (коэффициент автокорреляции —  $0,14 \pm 0,09$ ), что нет никаких оснований для учета этой связи. Положение существенно меняется, если рассмотреть связь стока смежных лет только в сериях подъема водности (верхняя часть поля, показанная крестиками). В этом случае связь окажется значимой (коэффициент корреляции —  $0,53 \pm 0,11$ ) и весьма существенной. То же самое ( $0,61 \pm 0,10$ ) характерно для серий спада (нижняя часть поля, кружочки). В этих условиях пренебрегать внутрирядной связью по меньшей мере не имеет смысла. Но и использована она может быть лишь тогда, когда будет заранее известно, в какой части автокорреляционного поля (верхней, нижней) находится искомая величина. Иными словами, необходимо сначала выяснить, будет ли следующий год относиться к серии подъема или к серии спада водности. Такая задача не может быть решена без специального изучения закономерностей смены серий подъема сериями спада, и наоборот. А здесь уже не обойтись без привлечения сведений о космических

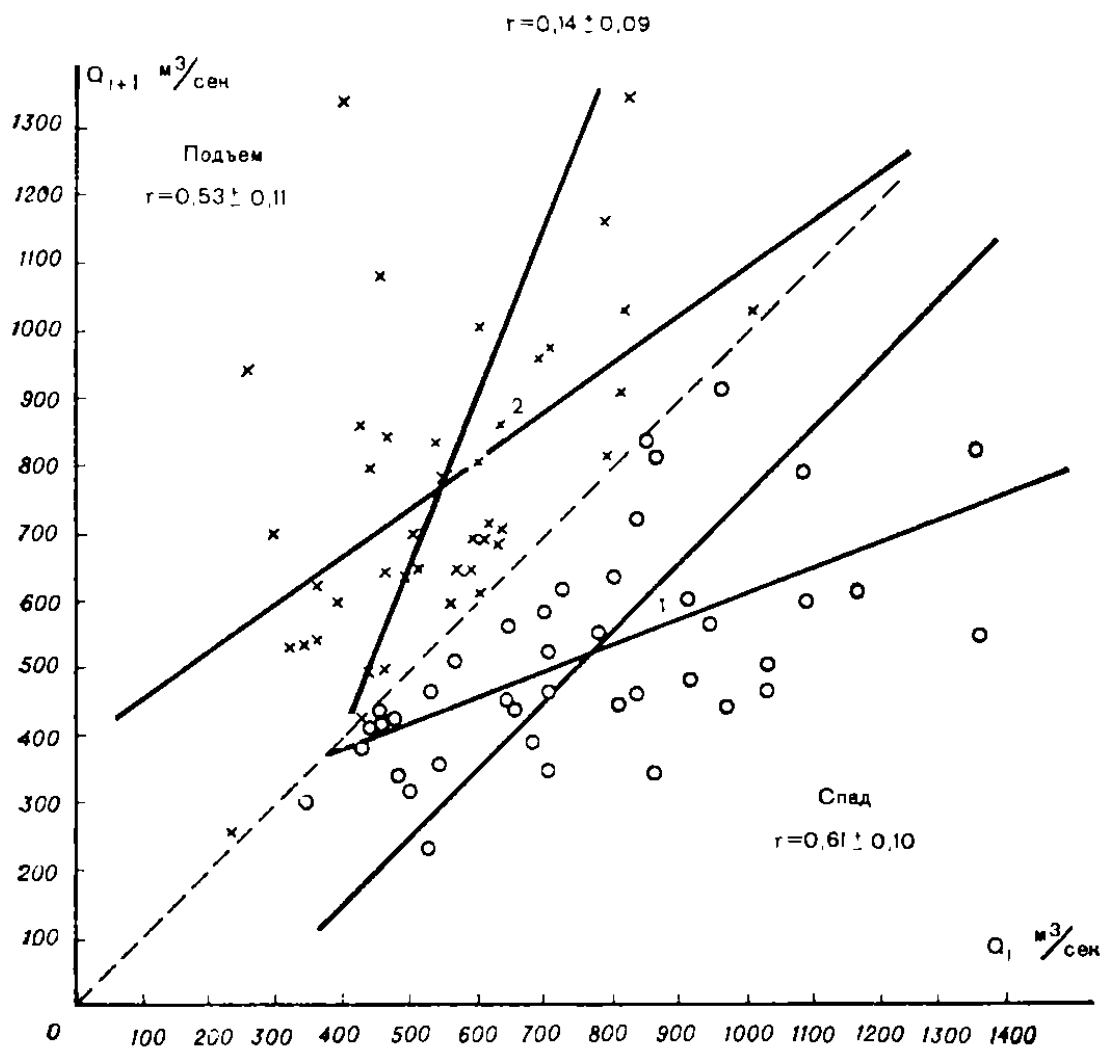


Рис. 18. Связь стока смежных лет. (автокорреляционное поле) р. Дона у Калача за 1881—1966 гг. Кружками показаны серии лет понижения, крестиками — повышения водности; 1,2 — соответствующие линии регрессии

факторах. Как будет показано ниже, для этих целей могут быть частично использованы связи резких изменений солнечной активности и переломов многолетнего хода природных процессов на Земле.

Аналогичное деление автокорреляционного поля на две части для приточности воды в озеро Байкал увеличило коэффициент корреляции с 0,46 до  $0,78 \pm 0,07$  и  $0,76 \pm 0,07$  соответственно в сериях подъема и спада. Для одной из характеристик земного магнитного поля соотношение этих величин оказалось следующим:  $0,80 \pm 0,07$  и  $0,82 \pm 0,05$  вместо  $0,67 \pm 0,07$  [79].

В названных примерах, как и в других условиях, деление автокорреляционного поля на две части дает очень большой эффект, но остающееся рассеяние (в каждой из двух частей) бывает все же довольно существенным. Здесь положение тоже может быть улучшено,

если удастся привлечь еще одну порцию дополнительной информации.

На рис. 19 показана связь относительных чисел солнечных пятен (числа Вольфа) в смежные годы. Общее рассеяние точек и в этом случае оказывается довольно

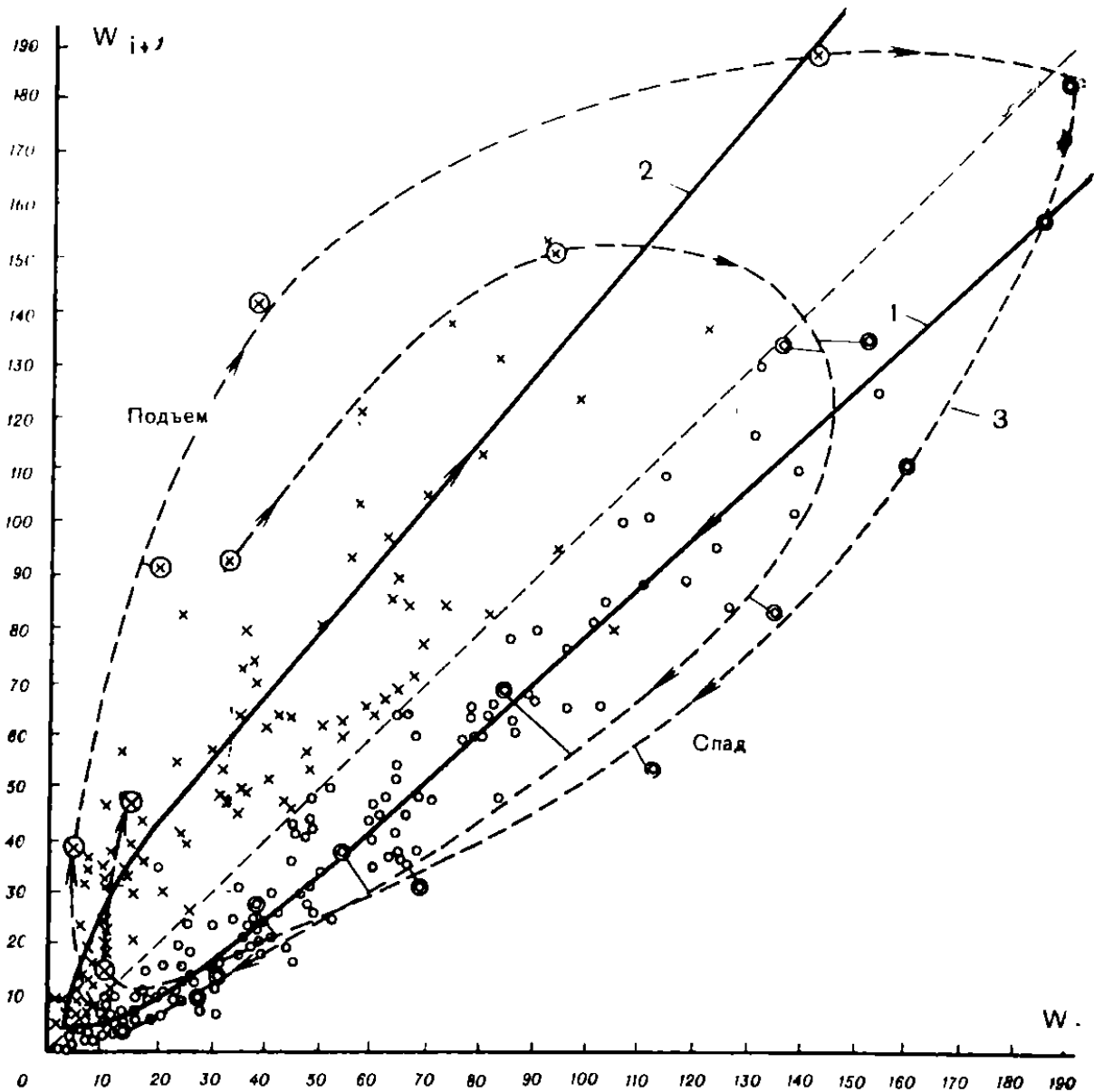


Рис. 19. Связь чисел Вольфа в смежные годы (автокорреляционное поле) за 1700—1966 гг. Кружками показаны серии лет понижения, крестиками — повышения солнечной активности, 1,2 — соответствующие обобщенные зависимости, 3 — схема действительной связи чисел Вольфа за 1945/46—1965/66 гг.

существенным. Оно значительно уменьшается при делении на ветви подъема (крестики) и спада (кружочки). Но и это еще не все. Рассматриваемое поле можно, оказывается, подвергнуть дальнейшему расчленению. Необходимо лишь учесть временную изменчивость анализируемой связи.