

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Эта книга – особенная. Это – не обычный сборник трудов Института, а сборник, подготовленный к Юбилею этого Института. Конкретно – Института прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова.

Задумывалась эта книга как подведение неких научных итогов работы Института за полвека и одновременно, как написанный ведущими специалистами Института обзор основных проблем, которыми последние десятилетия занимается Институт. Если бы удалось реализовать эти «задумки», книга должна была бы получиться очень ценной для сохранения истории Института и весьма интересной большинству специалистов, других институтов, работающих сейчас в тех же областях.

К сожалению, осуществить задуманное не удалось. Здесь не место обсуждать причины этого. Но ожидавшегося сборника обобщающих статей не получилось. Получился набор статей весьма разного объема, разной степени конкретизации рассматриваемых вопросов, весьма разного стиля.

Пожалуй, только статья В. А. Алпатова с соавторами отвечает высоким требованиям, которые первоначально были сформулированы при планировании сборника как важной части мероприятий по празднованию Юбилея Института. Статья дает широкую панораму исследований в области искусственных воздействий на атмосферу и ионосферу, начиная с пионерских работ 70-х годов и кончая проблемами сегодняшнего дня. Трогательно, что в число соавторов своей статьи В. А. Алпатов и его коллеги включили и двух человек, Н. В. Ветчинкина и Ю. А. Романовского, которых уже нет с нами, но которые стояли у истоков этого направления исследований в ИПГ и много сделали для его признания и развития.

Да, задуманное не получилось. Но Институт есть и юбилей грядет. Значит, сборник, все-таки, нужен. Пусть не такой фундаментальный, как хотелось бы при первоначальном планировании, но он есть. Есть статьи сотрудников Института, отражающие (в большей, или меньшей мере) основные направления работ сегодняшнего ИПГ. Но начинать надо, конечно, не с них.

Институт носит имя Евгения Константиновича Федорова, столетний юбилей со дня рождения которого был торжественно отпразднован несколько месяцев назад. Поэтому естественно начать юбилейный сборник именно статьей Е. К. Федорова.

Кому-то статья может показаться устаревшей и слегка наивной. Она ведь написана еще во времена СССР, а мы сейчас многие вещи видим иначе, чем они виделись из того времени. Но важно не это. Важно то, что она дает пример масштабного мышления государственного мужа, который смотрит на мировые проблемы иначе, чем смотрим мы. И в этом ценность этой статьи велика даже сейчас, когда с отдельными ее положениями можно поспорить. Только нужно ли?

Юрий Антонович Израэль был правой рукой Евгения Константиновича и в Институте, и в Росгидромете. Поэтому естественно, что следующей стоит статья Ю. А. Израэля, посвященная новому (интегральному) подходу к проблеме радиоактивного загрязнения среды после ядерных испытаний и аварий на ядерных производствах. И хотя в настоящий момент эта тематика не входит в круг задач ИПГ, в свое время эти работы велись в Институте широким фронтом, и сам Институт занимал ведущее положение в среде институтов, министерств, ведомств, которые имели отношение к этой важной проблеме. Сейчас это положение занимает возглавляемый Ю. А. Израэлем Институт глобальной экологии и климата.

Статью об активных воздействиях, в группу соавторов которой входит и Сергей Иванович Авдюшин, много лет руководивший Институтотом, мы уже упоминали выше. Как естественный переход на еще одну ступень исторической лестницы далее следует статья группы авторов во главе с нынешним директором Института Владимиром Борисовичем Лапшиным. Она посвящена «сверх - современной» проблеме. Всех волнуют вопросы того,

как влияет солнечная активность и другие проявления погоды в космосе на самые различные события на Земле. Правда, из весьма широкого круга этих вопросов, включающих эффекты нарушений связи и подачи электроэнергии (известные инциденты в Квебеке (Канада) и других местах), эффекты воздействия на работоспособность экипажей самолетов и космических кораблей, влияние на здоровье людей на поверхности Земли и др., авторы рассматривают лишь один – взаимодействие тепловых нейтронов с окружающим веществом на межфазных границах при слабом облучении при наличии сильного электрического поля (более 100 000 В/см). Пока важность этой проблемы и ее место в общей проблеме «земное эхо солнечных бурь» не очевидны, но внушительный коллектив авторов позволяет надеяться, что у этой проблемы большое будущее.

Дальнейшие статьи (уже без соавторства директоров Института прошлых, или нынешних) отражают основные направления работ Института, который, уместно напомнить, выполняет в настоящее время функции Прогностического центра Гелио-геофизической службы.

Не перечисляя всех статей, отметим статью Н. П. Данилкина и Н. Г. Котонаевой, которые сделали новый принципиальный шаг в радиозондировании ионосферы. Проведя эксперименты на станции «МИР», они показали, что зондирование ионосферы с высот слоя F2 не только реально, но и открывает новые возможности изучения характеристик ионосферы, в частности, ее неоднородной структуры. Стоит упомянуть и две статьи (Ю. К. Калинин и С. А. Пулинец и Д. Узунов), посвященных проблеме ионосферных проявлений землетрясений. Важность проблемы очевидна и пояснений не требует. В двух упомянутых статьях, хотя и с несколько различных позиций, проводится одна и та же мысль – сильные землетрясения оставляют свою подпись («signature») в ионосфере как до, так и после события, и элементы этой подписи можно и нужно учиться искать с помощью спутниковых и наземных наблюдений.

На первый взгляд, несколько в стороне стоит статья Е. Н. Хотенко. Но следует помнить, что ИПГ выпускает большое количество различной информации, часть которой он продает различным заказчикам. Большая часть этой информации касается условий ионосферного распространения радиоволн, и потому, как правильно распорядиться этой информацией в экономическом плане – вопрос отнюдь не праздный и важный для работы и жизни Института.

Подводя итог этому короткому предисловию, можно, все-таки, утверждать, что данный сборник (хоть он и не стал тем, чем хотелось – итоговым трудом, всесторонне освещающим научную жизнь Института хотя бы в последние десятилетия) содержит добротные статьи, отражает общее направление работ Института и, будем надеяться, станет хорошим подарком к предстоящему Юбилею.

А. Д. Данилов

# Некоторые проблемы развития наук о Земле

Е. К. Фёдоров

В общей совокупности современного знания можно выделить науки о Земле: географию, геологию, геофизику, геохимию, метеорологию, океанографию и ряд других. Они изучают то, что принято называть стихийными явлениями. Мы попытаемся рассмотреть основные задачи этих наук, их место в системе познания и некоторые перспективы развития в будущем. При этом нас будут интересовать, главным образом, общие черты, а не специфические задачи каждой из этих наук.

Сведения, добываемые науками о Земле, нужны для того, чтобы наиболее выгодно и целесообразно строить взаимодействие человеческого общества и природы. На протяжении истории взаимодействие человечества с природой непрерывно изменяется, становясь все более глубоким и разносторонним. Однако во всей его многогранности можно выделить две важные линии: во-первых, использование природных ресурсов и, во-вторых, разумный учет и использование свойств природной среды, влияющих на практическую деятельность человека.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Тысячи лет назад люди равнодушно проходили мимо месторождений железа, а еще совсем недавно не видели никакой существенной ценности в урановых рудах. В настоящее время почти все вещества, имеющиеся на нашей планете, используются либо как основа для получения различных материалов, либо как источники энергии. Быстро расширяется и объем используемой в производстве доли от общего запаса каждого из них. Хотя здесь пределы еще очень далеки даже для наиболее дефицитных природных богатств (например, для нефти), но все же используемая часть в ряде случаев становится сравнимой с общими запасами. Отсюда возникает важный вопрос: хватит ли природных богатств для удовлетворения нужд человечества?

Многие буржуазные экономисты, начиная с Мальтуса, приходили к неправильному выводу о том, что конечность природных ресурсов в сопоставлении с неограниченным ростом населения приводит к недостатке природных ресурсов, не только препятствующей дальнейшему развитию человеческого общества, но являющейся причиной многих основных недочетов в его нынешнем состоянии. Современные сторонники Мальтуса утверждают, что угроза перенаселения является ныне чуть ли не самой страшной угрозой для человечества.

Утверждения неомальтузианцев неверны. Нас не интересуют нефть, уголь или другие природные богатства сами по себе, - их может быть больше или меньше, может наступить и такой момент, когда их не будет совсем. Дело не в них, а в том, как удовлетворяются и будут удовлетворяться в дальнейшем основные потребности человеческого общества в энергии, материалах, пище, в территории для обитания.

Как же обстоит дело, например, с энергией? С течением времени стремительно растет количество энергии, используемой человеческим обществом, - и в абсолютных цифрах и в расчете на душу населения. Однако еще более стремителен рост потенциальных энергетических ресурсов, которые приходятся ныне на каждого человека. Это обусловлено, во-первых, тем, что не время увеличивается эффективность уже известных источников энергии, растет коэффициент полезного действия тепловых машин, появляются новые преобразователи энергии, и, во-вторых, тем, что появляются новые источники энергии. Возможность использования атомного горючего сразу резко увеличила запасы энергии, приходящейся на каждого человека. Запасы сырья для

термоядерной энергии огромны. Немало перспектив сулит прямое использование солнечной энергии, энергии приливов, морских течений и т. д. В результате запасы всех возможных энергетических ресурсов, приходящихся на душу населения земного шара, сейчас много выше, чем раньше, и все время увеличиваются, хотя объем каждого из известных ресурсов либо стабилен, либо уменьшается. Так, в 1850 г. потенциальные запасы невозобновляемых энергетических ресурсов в расчете на душу населения можно было оценить величиной в 104 кВт - час, а в 1950 г. - в 2.105 кВт - час.

В будущем скорее возникнет проблема избытка энергии (точнее, избытка тепла), а не ее недостаточности. Если рост энерговооруженности человека будет продолжаться такими же темпами, как до сих пор, то, как показывают некоторые подсчеты [1], через несколько десятков лет количество выделяемого человечеством в процессе производственной деятельности тепла станет заметным, а затем и сравнимым с тем, что получает Земля от Солнца. Тогда потребуются изменить тепловой баланс Земли и научиться отводить значительное количество тепла в мировое пространство, чтобы избежать существенного разогревания земной поверхности. Надо полагать, что в свое время эта задача не будет представлять непреодолимых затруднений.

Примерно так же обстоит дело с питанием. С течением времени сельское хозяйство становится все более производительным. Одно это открывает широкие перспективы увеличения количества пищевых продуктов. Мы сейчас лишь едва используем океан, а в нем, кроме рыбы, имеются огромные запасы биологического сырья. Современная химия подошла к производству синтетической пищи. Её производство потребует небольшого количества сырья и меньших затрат труда в сравнении с тем, который необходим для получения продуктов питания в сельском хозяйстве.

Прогресс физики и химии позволяет предполагать, что необходимые человеку вещества при наличии энергии и какого-то количества исходного материала могут быть получены практически из любого сырья.

Некоторые неомальтузианцы всерьез опасаются, что через несколько столетий поверхность Земли окажется недостаточной для размещения людей. Но ведь пройдет немного десятилетий и человечество будет в состоянии установить систематическое межпланетное сообщение. Оправдается предвидение К. Э. Циолковского о том, что человечество в поисках света и тепла распространится по всему околосолнечному пространству.

Сторонники малтузианства ведут расчеты количества населения, которое может прокормить Земля при современных методах ведения хозяйства. Наши исследователи, возражая им, сообщают другие, более справедливые оценки продуктивности сельского хозяйства и указывают на неизбежность появления в будущем новых ресурсов [2]. Однако нам кажется, что для исторической экстраполяции более убедительно сравнивать темпы роста населения и темпы роста запасов потенциальных ресурсов, обеспечивающих удовлетворение основных потребностей человеческого общества. До сих пор рост энергетических и пищевых ресурсов в результате технического и научного прогресса значительно опережал рост населения. Нет никаких оснований считать, что в дальнейшем это соотношение изменится.

Современные сторонники мальтузианских взглядов проявляют беспокойство по поводу быстрого роста населения в странах, не достигших высокого уровня экономического развития. Так, известный американский ученый Х. Браун в недавно опубликованной статье [3], высказав верное положение о том, что экономическое развитие страны должно опережать рост численности населения, вслед за тем говорит, что задержка роста численности населения эквивалентна увеличению темпов технического прогресса. Он утверждает далее, что ликвидация болезней и эпидемий в слабо развитых странах без соответственного сокращения рождаемости привела бы к катастрофе (!). Такие взгляды распространены среди западных ученых и имеют сторонников в кругах интеллигенции слаборазвитых стран [4]. Но они неправильны в принципе. Благосостояние народа зависит



от социального строя и от уровня развития производительных сил, которые включают трудовые ресурсы населения. Человек всегда производил и тем более сейчас может производить больше, чем потребляет. Поэтому большая численность народонаселения в условиях разумного общественного устройства может только способствовать ускорению темпов экономического развития.

Браун мог бы вспомнить, что в истории человечества неоднократно наблюдались случаи, когда население целых стран значительно сокращалось в результате войн и колониальных захватов. Однако это никогда не приводило к повышению благосостояния оставшегося населения. Разве лучше стали жить многочисленные индейские племена обеих Америк или аборигены Австралии после того, как их численность была сокращена в несколько раз? Как известно, численность негритянского населения Конго уменьшилась примерно вдвое за годы бельгийского владычества, но благосостояние конголезцев не улучшилось.

Темпы экономического развития, разумеется, должны превышать темпы роста населения. Пример Советского Союза и других социалистических стран показывает, что страны, даже бывшие в прошлом слабо развитыми в промышленном отношении, при разумном социальном строе могут обеспечить высокие темпы развития экономики, превышающие во много раз темпы роста населения. Именно ускорение темпов роста производительных сил, а отнюдь не сокращение рождаемости, решает проблему развития стран, имеющих низкий уровень экономики и большую численность населения.

Таким образом, ограниченность (конечность) природных ресурсов не препятствует развитию человеческого общества в будущем и не вносит в настоящее время каких-либо затруднений в его деятельность. Однако, разумеется, это не означает, что мы можем как попало использовать природные богатства и как угодно вмешиваться в естественные процессы.

Можно отметить определенную линию в практике использования природных богатств. Первобытный человек брал от природы то, что мог. Людей было мало, и их общее вмешательство в природные процессы было ничтожным. С тех пор, как возникло сельское хозяйство, люди начали выделять из окружающей природы малую часть - пашню, луг, стадо животных, - в культивирование которой вкладывали большой труд и заботу. Остальное оставалось диким, ничейным и использовалось на основе старых охотничьих принципов для добычи сырья, материалов и продовольствия. С развитием капитализма значительная часть природных ресурсов, как используемых, так и потенциальных (по существу все, кроме мирового океана), стала частной собственностью.

При этом особенно широко распространились уродливые формы ведения сельского хозяйства и хищническое использование природных богатств. Еще 100 лет тому назад К. Маркс, подметив это, указал, что культура, если она развивается стихийно, а не направляется сознательно, оставляет после себя пустыню [5, стр. 202]. Так, разрушение древних оросительных систем, введение монокультур, уродующих традиционное сельское хозяйство, но выгодных колонизаторам, вызвали страшные голодовки индийского и других народов.

Стихийный характер взаимодействия человеческого общества, а в особенности капиталистического общества, с природой при быстро возрастающем масштабе воздействия представляет определенную опасность. Понимание этой опасности - одна из причин возникновения широкого движения за охрану природы. В капиталистических странах это, прежде всего, охрана природы у себя дома. Многие из этих стран имеют у себя отличные заповедники и вместе с тем, они же всячески способствуют самой хищнической эксплуатации природных богатств в колониях и в экономически зависимых от них странах.

Конечно, необходимо бороться с хищничеством в использовании природных богатств. Однако охрана природы, обычно понимаемая как невмешательство в ход

естественных процессов, не является основной мерой. Вряд ли нужно стремиться к тому, чтобы превратить природу в некий всеобъемлющий заповедник.

Нам нужен лес. Нужен как источник сырья, как регулятор питания рек, наконец - как элемент ландшафта. Однако из этого не следует, что надлежит сохранять всякий лес в его натуральном состоянии - с болотами и комарами, с преобладанием малоценных пород деревьев. Используя и восстанавливая лес, надо добиваться его преобразования в такое состояние, которое наиболее полным образом отвечает интересам общества. Нельзя мириться с существованием пустынь или заботиться о сохранении вечной мерзлоты.

Очевидно, не защита природы от влияния человека, а преобразование природы в интересах человека должно стать одной из основных задач во взаимодействии природы и общества. Такова естественная проблема, возникающая в развитии социалистической, сознательно направляемой культуры. Она не превратит сад в пустыню, а наоборот, преобразует пустыню в цветущий сад.

## ЗНАЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Условия, в которых живет человек, - ландшафт местности, наличие полезных ископаемых, климат и т. д., - оказывают существенное влияние на его деятельность, а иногда определяют те или иные ее стороны.

Прежде человек мог существовать в весьма узком диапазоне природных условий. По мере развития техники и роста производительных сил этот диапазон расширялся. В настоящее время техника позволяет обеспечить существование человека даже в космическом пространстве. При этом важно отметить, что расширение диапазона условий внешней среды, в которой может существовать человек, происходит не за счет приспособления его биологической природы к этим условиям, как это имеет место у животных, а за счет умело применяемых средств защиты, изоляции и различных приспособлений - при сохранении в основном физиологической природы человека.

Не все учитывают, однако, что уменьшение зависимости от природных условий отнюдь не означает снижения их практической значимости. Наоборот, технический прогресс заставляет учитывать все более тонкие особенности природных процессов.

Современный корабль не зависит от ветра, как его парусный предок 100 лет назад, однако сложная навигационная техника, применяемая в настоящее время, требует знания и учета таких явлений, как распространение радиоволн в ионосфере, отражение лучей радиолокатора в облаках и осадках, и многих других.

Полеты несовершенных самолетов, которыми пользовались 40 лет назад, в очень сильной степени зависели от погоды. Однако для их обеспечения требовалось лишь весьма примитивное понимание погодообразующих процессов и очень простые данные о состоянии метеорологических элементов в нижнем 300 – 500 - метровом слое атмосферы. Для этого было достаточно наземных наблюдений. Современный самолет может летать почти в любых метеорологических условиях, однако, для этого необходимы гораздо более детальные и более срочные сведения о погоде и собирать их нужно с огромного пространства, соответствующего дистанции полета. Теперь приходится учитывать направление и скорость струйных течений в нижней части стратосферы, особенности турбулентных явлений в тропопаузе и т. д., так же, как и состояние атмосферы в нижних слоях атмосферы в районах взлета и посадки.

До появления подводных лодок мало кого интересовали тонкие различия в плотности разных масс морской воды. В настоящее время знания поверхности раздела между водными слоями в океане играют огромную роль: на них может лежать подводная лодка, от них отражается гидроакустическая волна сигнальных приборов.

Рассматриваемое положение с особой отчетливостью выявляется при исследовании верхних слоев атмосферы и ближайшей к Земле зоны космического пространства -

области, в которую сейчас вступает человечество. Верхние слои атмосферы первыми встречают потоки частиц вещества и лучистой энергии, идущие от Солнца и из глубин Космоса. Электромагнитное излучение Солнца, приходящееся на область видимого света, является источником энергии почти всех геофизических процессов и обеспечивает косвенным образом энергетические потребности промышленности. Эта основная по количеству энергии часть солнечного излучения, достигающая Земли, весьма стабильна. Незначительная по своей мощности и количеству часть солнечного излучения и вещества подходит к Земле в форме ультрафиолетового и рентгеновского излучения, гамма-квантов и корпускулярных потоков, состоящих из атомных ядер и отдельных элементарных частиц. Это излучение не доходит до земной поверхности, а поглощается в верхних слоях атмосферы. Здесь в результате его взаимодействия с разреженными газами атмосферы и постоянным магнитным полем Земли возникает ряд фотохимических и электромагнитных явлений (образование ионосферы, возникновение магнитных бурь, полярные сияния и др.), определяющих физическую структуру и весь режим верхних слоев.

Потребность в точных и достоверных данных о строении и режиме верхних слоев атмосферы в ближайшей к Земле области космического пространства резко возросла в последние годы в связи с развитием техники реактивного полета и радиосвязи. Еще не так давно точные данные о плотности вещества на высотах 500 или 1000 км интересовали только исследователя, занимающегося геофизическими проблемами. Инженер рассматривал это пространство как вакуум и имел все основания считать его вакуумом, пока скорости движения аппаратов не достигли нескольких километров в секунду. Однако уже при первой космической скорости это пространство представляется своеобразной средой с определенными физическими свойствами, весьма важными для расчета движения.

В настоящее время столь же пустыми кажутся нам отдаленные от Земли области космического пространства.

Не нужно обладать особой проницательностью, чтобы предсказать огромное практическое значение, которое приобретут тончайшие особенности его структуры (распределение плотности вещества, строение силовых полей) для космонавтики с ее скоростями движения в сотни и тысячи километров в секунду.

Потребность в сведениях о всех более тонких особенностях природных явлений приводит, с одной стороны, к большому осложнению техники наблюдений и анализа, а с другой, - к необходимости срочно собирать эти сведения с больших пространств. В связи с этим возникает потребность в специальных сетях наблюдательных пунктов, рационально распределенных по всей поверхности земного шара. Еще 100 лет назад систематические наблюдения включали измерения значений лишь немногих метеорологических элементов в нижнем слое атмосферы, регистрацию элементов земного магнетизма, регистрацию землетрясений. Деятельность современной мировой сети геофизических станций и обсерваторий неизмеримо многостороннее.

Вероятно, запуски крупных ракет, поднимающих большой груз научной аппаратуры на высоту в несколько сот километров, чтобы выполнить наблюдения в течение десятков секунд, представляют определенный предел, к которому подошла система геофизических наблюдений в своем усложнении и удорожании. Спутники позволяют преодолеть эту трудность. Будучи раз запущены, они дают возможность в течение длительного времени собирать огромное количество геофизической информации по всему земному шару. Несомненно значение спутников для регулярных наблюдений службы погоды. С их помощью оказывается возможным определять температуру поверхности Земли, распределение облаков и т. д.

Природная среда - это сложная совокупность непрерывно действующих процессов. Некоторые из них развиваются крайне медленно по сравнению с человеческим масштабом времени. Таковы геологические процессы, меняющие лик Земли, формирующие материки и океаны. В практических задачах мы часто рассматриваем геологическую обстановку как

постоянную. Более существенны для человека изменения, происходящие в промежутке времени, сравнимом с его жизнью: таковы изменения в погоде, в режиме океанов и морей, в климате.

Природная среда влияет определенным образом на человеческую деятельность. Вместе с тем уже давно стало ясным, что человек в свою очередь воздействует на состояние природной среды. Используя естественные ресурсы, он изменяет атмосферу, гидросферу и в некоторой степени, твердую земную кору. Сжигание топлива увеличивает концентрацию  $CO_2$  в воздухе. Выброс других химических продуктов промышленности и продуктов атомных взрывов в атмосферу также изменяет ее состав и свойства. Так, взрывы мощного ядерного оружия в несколько раз увеличивают радиоактивность атмосферы на срок в несколько месяцев по сравнению с естественным фоном и соответственно изменяют ее электрические характеристики - проводимость, ионный баланс и др. Вредное биологическое действие радиоактивных продуктов атомных взрывов хорошо известно. Высотные взрывы существенно изменяют электромагнитные процессы, протекающие в верхних слоях атмосферы, в результате чего значительно нарушается режим радиосвязи. Вместе с тем пока не обнаруживается существенных изменений в практически важных метеорологических явлениях (температура воздуха, осадки, ветер, облачность), которые были бы следствием атомных взрывов [6].

Повышение концентрации  $CO_2$  в атмосфере увеличивает ее теплоизолирующую способность и в общем ведет к повышению температуры земной поверхности. Геофизическая роль накопления окиси азота, сернистых соединений и различных аэрозолей в воздухе пока невелика, если не считать стимулирование местных туманов в крупных промышленных центрах, однако их биологическое действие, и в особенности вредное воздействие на здоровье окружающего населения и на растительность, существенны и общеизвестны.

Изменяются свойства земной поверхности. Общая площадь культивируемой земли достигла сейчас около 10% всей территории суши. Мелиоративные мероприятия охватывают около 1%, включая сюда орошение, осушение, создание искусственных водохранилищ. Это в какой-то мере влияет на влагооборот и на тепловой баланс. Добыча полезных ископаемых изменяет установившееся соотношение между различными веществами, из которых состоит земная кора. Таким образом, изменения, вносимые человеком, стали заметными, а в некоторых случаях и сравнимыми с масштабом природных процессов.

Взаимодействие общества и природы в целом подошли сейчас к такому этапу своего развития, когда на первый план все заметнее выступает активная роль человека по отношению к совокупности природных явлений. Развитие наук о Земле должно, очевидно, соответствовать этому положению.

## МЕСТО НАУК О ЗЕМЛЕ В СИСТЕМЕ НАУК

В последние десятилетия возникло много новых наук. Это вызвано как разветвлением и детализацией исследований, так и установлением взаимодействия между ранее разобщенными областями знания. Однако в ходе этого естественного процесса иногда возникают несообразности. Нередко разные по названию науки занимаются одним и тем же предметом. Иной раз выделение новой самостоятельности научной дисциплины не имеет основания, так как на поверку оказывается, что в данном случае речь идет лишь о том или ином индивидуальном подходе исследователя к объекту. Часто конкретная проблема, в принципе разрешимая задача в той или иной области науки смешивается с научной дисциплиной.

Во многих случаях современное конкретное содержание науки не соответствует ее старому традиционному определению.

Существенные неясности имеются, в частности, и в систематике наук о Земле, Что такое, например, геохимия - часть химии, часть геологии или самостоятельная наука на стыке этих двух? Какая разница между физикой моря и физической океанографией, между физикой атмосферы и метеорологией, между океанографией и океанологией? Относится ли метеорология к географическим или к физическим наукам?

Известно, что ученые придерживаются самых различных взглядов на этот счет. Между тем, взаимопонимание и четкость в определении научных дисциплин имеют существенное значение. С ними связаны организационная структура научно-исследовательских институтов и лабораторий, система подготовки кадров, важные вопросы планирования и координации научных исследований.

Попытаемся осмыслить содержание наук о Земле и их место в современном естествознании. Общей чертой наук о Земле является то, что они рассматривают физические, химические и отчасти биологические процессы, происходящие в масштабе земного шара или крупных его частей. Можно различить две группы этих наук. Старые, в которых оформлялись и систематизировались первые сведения, получавшиеся человеком об этих процессах и о строении земного шара: география, геология, метеорология, гидрология суши, океанология (или океанография). Это науки об определенных объектах: с поверхности Земли, о структуре ее коры, об атмосфере, реках и озерах, об океане. Каждая из них начинала в свое время с учета и описания явлений, а затем переходила к их анализу, пыталась понять их механизм и законы. При этом использовались в самой простой, иногда примитивной форме (но всегда в комплексе) методы и закономерности, заимствованные из физики, химии и биологии.

За последние десятилетия в эту совокупность «старых» наук о Земле влились бурно развивающиеся новые науки: геофизика, быстро разделившаяся на физику атмосферы, физику земной коры, физику моря, геохимия - в основном исследующая круговорот веществ в твердой земной коре и биосфере и многочисленные разветвления этих наук. Они были созданы и развиты физиками и химиками, начавшими изучать планетарные процессы.

Почему они были созданы? Не было ли главной причиной этого то, что «старые» науки о Земле слишком медленно шли к анализу механизма процессов, отставали в разработке точных способов измерений, не успевали быстро применять к стихийным процессам разработанные физиками и химиками методы, в то время как практика в этом остро нуждалась (точная характеристика свойств среды, дистанционные методы разведки минерального сырья и т. д.)?

Геофизика и геохимия, как это видно из определений их предмета, казалось бы, должны изучать с помощью своих специфических методов соответственно физическую или химическую сторону планетарных процессов. Однако в действительности дело обстоит иначе. Во-первых, геофизика и геохимия не ограничиваются изучением только своих специфических сторон природных процессов, а пытаются заняться всесторонним изучением некоторых процессов в целом. Это особенно заметно в изучении атмосферы. Как метеорология, так и физика атмосферы изучают все процессы, происходящие в атмосфере. Между этими науками по существу нет никакой разницы. Кстати говоря, физика атмосферы исследует также и многие химические стороны атмосферных явлений (например, в явлениях образования облаков или в реакциях, происходящих в верхних слоях). Геофизика же твердой Земли идет как бы параллельным курсом с геологией, рассматривая целиком, но со своей точки зрения, некоторые планетарные процессы, которые в то же время являются объектом внимания геологии.

Мы еще вернемся к характеристике «старых» и «новых» наук о земле, а сейчас рассмотрим, какое место они занимают среди других естественных наук. Вспомним принципы классификации наук, предложенные Ф. Энгельсом в «Диалектике природы». Ф. Энгельс, как известно, стремился к тому, чтобы не допустить случайности в систематизации знаний. Основным признаком классификации наук он считал формы

движения материи. «Классификация наук, из которых каждая анализирует отдельную форму движения или ряд связанных между собою и переходящих друг в друга форм движения, - писал Ф. Энгельс, - является вместе с тем классификацией, расположением, согласно внутренне присущей им последовательности, самих этих форм движения» [7 стр. 198]. «Подобно тому, - писал он далее, - как одна форма движения развивается из другой, так и отражения этих форм, различные науки, должны с необходимостью вытекать одна из другой» (там же, стр. 199).

Исходя из этого, Ф. Энгельс наметил определенную последовательность наук, которая начинается с математики и механики, переходит к физике, химии, биологии, психологии, социальным наукам и замыкается философией, обобщающей данные частных наук.

Классификация наук была предложена Ф. Энгельсом 90 лет тому назад. В настоящее время содержание наук в значительной степени изменилось. В особенности это относится к физике и химии. Они уже далеко не те, чем были во второй половине XIX в. Если Ф. Энгельс считал физику наукой о формах движения тел, состоящих из множества «элементарных» частиц, а химию - наукой о формах движения «элементарных» частиц материи, из которых состоят более сложные тела, то к современным установившимся понятиям о физике и химии эти характеристики совершенно не подходят.

Б. М. Кедров, как мне кажется, совершенно правильно обратил внимание на это и предложил несколько способов представления современной физики и химии в схеме Ф. Энгельса [8]. Однако по-прежнему сохраняется четкая и вполне определенная граница между физикой и химией, с одной стороны, и биологией, изучающей живую природу, - с другой. Столь же ясно наличие особой формы движения, связанной с мышлением и, наконец, с деятельностью человеческого общества.

Таким образом, ряд, установленный Ф. Энгельсом, и в настоящее время, за исключением некоторых, вполне назревших изменений в области физики и химии, в целом, с достаточной четкостью определяет классификацию основных разделов знания. Должен ли он включить в себя все существующие науки и, в частности, науки о Земле? Некоторые исследователи пытаются сделать это так: геологию располагают между химией и биологией и всю совокупность технических наук включают в область химии и физики (см. [9]). Но это неправомерно и не нужно. Последовательность наук, предложенная Ф. Энгельсом, как нам представляется, не рассчитана на то, чтобы включать в нее все науки. Ф. Энгельс не включал в предложенную им классификацию геологию и некоторые другие хорошо известные в его время науки. Каждая из наук, входящая в последовательный ряд, должна удовлетворять двум условиям: во-первых, она исследует отдельную форму движения или ряд взаимосвязанных и переходящих друг в друга форм движения и, во-вторых, будучи в ряду других, наука определенным образом связана со своими соседями.

Расположение наук соответствует расположению и связи самих форм движения материи.

Изучают ли науки о Земле свои особые формы движения материи? Б. М. Кедров [8], а за ним Г. Л. Поспелов [10] и Е. В. Шанцер [11] выдвинули понятие о геологической и так называемой планетарной форме движения, которая, по их мнению, и составляет основной предмет исследования геологии и других наук о Земле. Однако, нам кажется, что это - искусственное построение. Какие иные формы движения в стихийных процессах можно найти, кроме тех, которые исследуют физика, химия и биология?

Конечно, стихийные процессы имеют свои определенные особенности. В них весьма сложным образом переплетаются явления, относящиеся к разным формам движения материи, - физические, химические и в значительной степени биологические. Все изучаемые явления имеют большие масштабы в пространстве и во времени. Здесь есть своеобразные, не повторяющиеся в других явлениях связи, комбинации основных форм движения материи, есть специфическое взаимодействие между ними. Эти особенности и

своеобразие позволяют выделить особые науки, но не дают оснований говорить об особых формах движения материи.

Г. Л. Поспелов считает, что важнейшая особенность планетарной формы движения состоит в том, что с нее начинается поляризация материи на органическую и неорганическую природу. Жизнь, действительно, по всей вероятности, могла возникнуть только на планетах, и для понимания законов развития организмов надо изучать их взаимодействие со средой. Но ведь и почти все сложные вещества - соединения элементов - тоже могли возникнуть только на планетах, т. е. в определенном диапазоне температур, давлений, действия радиации и других факторов. Не следует ли тогда считать и химическую форму движения вытекающей из планетарной? Надо иметь также в виду, что жизнь в известных нам формах может возникнуть на планетах только в сравнительно редких случаях, а следовательно, не является ни обязательным, ни характерным признаком планет. С другой стороны, сами планеты существенно изменяются в результате деятельности биосферы. Выходит, что планетарная форма движения должна и предшествовать биологической и следовать за ней.

Другой важнейшей особенностью планетарной формы движения Г. Л. Поспелов считает ее общую направленность в сторону «самоконсервации» с достижением, в конечном счете, внутреннего равновесия. Однако относительная устойчивость на определенном этапе развития характерна для любого природного объекта и явления. Разве это не справедливо по отношению к атомному ядру, атому в целом, молекуле, кристаллу? Если же Г. Л. Поспелов считает, что «самоконсервация» планеты подобна устойчивости живого организма, то, как я полагаю, он ошибается. Устойчивость организма в окружающей среде основана на обмене веществ и способности к воспроизводству - свойствах, существенно отличных от планетарных и любых других процессов в неорганической природе.

Таким образом, по моему мнению, науки о Земле не имеют своим предметом особые специфические формы движения материи.

Не удовлетворяют они и второму условию, характерному для всякой науки, изучающей специфическую форму движения материи. Науки о Земле опираются на математику, механику, физику, химию и биологию, ибо стихийные процессы представляют совокупность соответствующих форм движения материи, но сами не служат опорой для других наук - членов основного ряда, которые следовали бы за ними.

Так, движение материи, присущее живому веществу, изучаемое биологией, включает в себя более простые формы движения, изучаемые физикой и химией (хотя и не сводятся к ним). Нельзя познать биологических явлений, не понимая физических и химических закономерностей, - но при этом совершенно не нужны закономерности, установленные геологией, метеорологией или географией (не говоря, конечно, о всегда желательной широте общего кругозора исследователя).

Многие исследователи считают: если не все науки о Земле, то по крайней мере геофизика и геохимия являются, соответственно, частью физики и химии. Полагаю, что это неверно. Как физика, так и химия или, правильнее сказать, обе эти науки, взятые вместе, занимаются изучением некоторых основных свойств материи, основных свойств вещества и излучения. Именно в этом их главная цель. Геофизик же и геохимик ведут свои исследования не для того, чтобы увеличить знания об основных формах движения материи. Они пользуются закономерностями, полученными в физике и химии, для того, чтобы разобраться в тех стихийных явлениях и процессах, которые происходят на нашей планете или внутри нее. Успехи геофизики и геохимии ничего по существу не добавляют к физике и химии. Физик может не знать геофизики и, кстати говоря, большинство физиков ее не знает, и это не мешает им успешно работать. Но геофизик не может не знать физики. Без основательного знания физики он не может найти в сложных стихийных явлениях тех механизмов, которые их обуславливают. Поэтому представление о

геофизике или геохимии как о части физических и химических наук, по моему мнению, неправомерно.

Только немногие науки укладываются в ряд, указанный Ф. Энгельсом. Но они-то и являются основными, опорными во всей системе познания. Не зря их называют фундаментальными науками. На них опираются все остальные, они же образуют четкий ряд, точно отвечающий последовательности развивающихся одна из другой форм движения материи. Задача каждой из этих наук - изучение закономерностей соответствующей формы движения материи, в то время как науки о Земле изучают определенные природные объекты. Поэтому целесообразно выделить науки о Земле в особую группу.

Наряду с науками о Земле к этой же группе можно отнести некоторые науки о небесных телах и явлениях, происходящих в космическом пространстве. При исследовании Космоса мы получаем результаты двоякого рода. Одни из них существенно расширяют наши знания в области фундаментальных наук. Таковы, например, результаты ныне ведущихся исследований взаимодействия частиц высоких энергий в потоках космических лучей; (как известно, пока нет возможности получить частицы со столь большими энергиями в земных условиях). Мы знаем о существовании во Вселенной небесных тел с очень большой плотностью, в десятки тысяч раз превышающей плотность веществ на нашей планете. Исследование таких состояний вещества так же безусловно внесет серьезный вклад в физику.

Изучение своеобразных форм жизни, которые, по всей вероятности, будут обнаружены на других планетах, быть может, существенно изменит некоторые основные положения биологии. В результате исследований Космоса каждая из фундаментальных наук обогащается сведениями о новых конкретных проявлениях соответствующих форм движения материи, с которыми не приходилось встречаться на Земле.

Вместе с тем в огромной степени развивается и совершенствуется наше представление об окружающем мире - о небесных телах и пространстве между ними, о генезисе звезд и планет, об их структуре и развивающихся на них стихийных процессах. Сейчас появляются только первые капли потока сведений, который совсем скоро с неудержимой силой хлынет в науку.

Уже появляются и начинают оформляться новые науки, например, астроботаника. Приходится слышать также и такое (в сущности, нелепое) название, как астрогеология. Это ведь не что иное, как своеобразные варианты наук о Земле, которые используют накопленный опыт исследования стихийных процессов и определенных объектов на нашей планете для изучения сходных процессов и объектов на других планетах.

Таких наук ранее не было потому, что единственным способом суждения о природе планет и звезд до сих пор было изучение их движения и излучений, что и явилось основным содержанием астрономии и астрофизики. Сейчас же стало возможным зондирование небесных тел автоматами, а скоро будет осуществлено и непосредственное исследование их человеком. Будем надеяться, что астро- или планетоаналоги геофизики, геологии, геохимии и других наук о Земле будут с большей комплексностью применяться на чужих планетах, нежели дома.

И еще одну группу наук - некоторые из биологических дисциплин - следует включить в рассматриваемый комплекс. Полагаю, что науки, исследующие явления в биосфере и комплексные процессы, в которых взаимодействуют элементы биосферы и элементы неорганической природы планеты, целесообразней рассматривать в группе наук о Земле, нежели в совокупности биологических наук, относящихся к основному ряду. По-видимому, сюда могут быть отнесены почвоведение, зоо- и фитогеография.

Таким образом, мы отобрали довольно большое количество наук. Имеет ли их совокупность какую-то структуру? Полагаю, что имеет. Однако это не та структура, которая связывает воедино ряд фундаментальных наук. Мы не можем расположить их в ряд соответственно развивающимся друг из друга формам движения материи, ибо каждая из



этих наук изучает процессы, включающие сразу многие основные формы движения материи. Здесь не будет и обязательной зависимости каждого последующего члена ряда от предыдущего. Вероятно, могут быть найдены разные приемы образования структуры в совокупности этих наук, однако, по-видимому, наиболее подходящим будет расположение их в одной из ветвей генезиса соответствующих объектов - от звезд к биосферам планет.

В другую совокупность разделов знания, не входящих в основную последовательность фундаментальных наук, можно было бы отнести прикладные науки - технические, сельскохозяйственные, медицинские, педагогические науки и др. Прикладные науки, подобно наукам о Земле, опираются на фундаментальные области знаний и комплексно применяют сведения из различных областей при решении своих задач. Как и науки о Земле, каждая из них имеет дело со многими формами движения материи.

Их особенностью является изучение своеобразных связей и комбинаций различных форм движения материи. Однако в отличие от наук о Земле, их общей задачей является разработка конкретных способов наиболее эффективного, с меньшей затратой труда, осуществления того или иного вида практической деятельности. Это может быть разработка новой технологии производственного процесса, нового способа лечения заболеваний, более совершенных методов преподавания и т. д. Именно вопрос о том, как лучше сделать что-то, характерен для этих наук. Медицина отличается от соответствующих разделов биологии тем, что она не только исследует закономерности патологических явлений, но и отыскивает пути их лечения и профилактики. Любая техническая наука непосредственно направлена на повышение эффективности методов и организации конкретных отраслей промышленного производства или сельского хозяйства.

Таким образом, совокупность наук можно было бы разделить на следующие три области:

- фундаментальные науки, каждая из которых изучает особую форму движения материи или совокупность различных форм движения; они образуют ряд, который в основных чертах был определен Ф. Энгельсом;

- науки о Земле (а, быть может, более широко - науки об основных природных объектах и процессах в окружающем мире), применяющие результаты фундаментальных наук для познания и использования человеком природных ресурсов и свойств окружающей среды;

- прикладные науки, применяющие результаты фундаментальных наук для разработки наилучших, наиболее эффективных конкретных форм того или иного вида практической деятельности.

## НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Основная, конечная цель комплекса наук о Земле - геологии, географии, геофизики, геохимии и других - дать обществу возможным образом использовать благоприятные и полезные особенности природных условий, совокупность которых образует природные богатства, и вместе с тем изыскать средства защиты от вредных и неблагоприятных стихийных явлений.

В каждой конкретной области такая цель достигается решением трех основных задач. Первая - наблюдение, описание и анализ природных явлений, вскрытие их генезиса и связи друг с другом. Эта задача исчерпывает большую часть практических требований к науке, в особенности, когда дело касается изучения сравнительно стабильных явлений, изменения которых в течение длительных промежутков времени несущественны. В тех случаях, когда мы имеем дело с меняющимися природными условиями, такими, как

погода, климат, гидрологический режим рек и морей, большое значение приобретает вторая задача - прогноз развития явлений во времени. И, наконец, третья задача - изыскание возможностей и путей активного воздействия на стихийные явления, изменения их в интересах человека.

Развитие любой науки представляет сложный процесс, в котором переплетаются творческая инициатива ученого, логика внутреннего развития самой науки и общественная необходимость и решение той или иной проблемы.

Если мы посмотрим на развитие какой-либо конкретной области знания вблизи, в деталях, то заметим, что постановка конкретных задач либо определялась желанием и инициативой ученого, либо являлась следствием прямого заказа со стороны производства. Если же мы взглянем на процесс развития науки в большей перспективе и отвлечемся от мелких деталей, то увидим, что в конце концов ее развитие отвечает основным нуждам общества в данной области.

Рассматривая развитие науки, мы не просто наблюдаем его тенденции, а стремимся направить развитие по определенному пути, наиболее отвечающему потребностям общества. Задачи планирования научно-исследовательских работ весьма сложны, так как при этом необходимо правильно сочетать инициативу ученых и общественную необходимость.

На Западе существует резкая грань между так называемым свободным творчеством ученого и его работой по заказу фирмы или правительства. Ученые, основной работой которых является преподавание в университетах, ведут исследования, выбирая темы и метод работы по своему усмотрению. С другой стороны, работая по заказу фирмы или правительственной организации, ученый поставлен в чрезвычайно жесткие рамки, он обязан вести работу «от сих и до сих», ибо заказчик не заинтересован в излишних поисках.

Только в социалистическом обществе сложились правильные взаимоотношения между личной инициативой ученого и общественной необходимостью. Ученый сам выбирает себе проблему, но он знает нужды производства, нужды общества в своей области и учитывает их потому, что сам является активным участником составления планов производства и принимает в нем то или иное участие. Государство, обеспечивает все научные исследования, так как его интересы достаточно широки, чтобы использовать, если не сейчас, то позже, любое ценное, важное научное открытие. Единственную его заботу составляет то, чтобы исследования велись на должном уровне, не повторяли уже известного, проникали в существо новых явлений и закономерностей.

Науки о Земле обеспечивают решение вопросов, возникающих при взаимодействии человека с природой, как при использовании природных ресурсов, так и при учете явлений среды, влияющих на его деятельность.

Рассмотрим, во-первых, изменения в характере этих наук, возникающие в связи с переходом от описания к анализу и расчету. Мы уже отмечали, что в свое время для каждой из них имел огромное значение сбор фактического материала. Необъятное множество фактических данных нужно было собрать и уложить в какую-то стройную систему. Нужно было научиться наблюдать природные явления и измерять их характеристики. Это означало не только решение многих методических задач, но также и труднейшую работу по организации систем наблюдения, по съемке и картированию в масштабе всего земного шара.

Великий труд нескольких поколений ученых был затрачен на описание Земли, на самую простую «инвентаризацию» предметов и явлений. Этот труд еще не вполне закончен. И тем не менее, он уже не может оставаться главной задачей. Либо наука, как, например, картография или «классическая» климатология, превращается в методику соответствующей службы, либо она переходит к новым задачам и лишь попутно продолжает собирать материал.

Переход от описания к анализу явлений и к разработке теории характерен для всех наук о Земле, однако, каждая из них по-своему следует по этому пути. В географии делаются лишь первые попытки анализа общих закономерностей образования ландшафтов и развития других географических явлений. Далее продвинулась геология. Попытки вскрыть механизм тектонических процессов в настоящее время являются, пожалуй, основным содержанием теоретической геологии. Еще дальше на этом пути продвинулись наука об океане и особенно науки об атмосфере и явлениях, происходящих в космическом пространстве.

Можно наблюдать, как в этом процессе «новые науки» теснят «старые» и постепенно занимают их область. Так, в настоящее время геофизика твердой Земли по существу теснит геологию и географию. Казалось бы, например, что геология, как наиболее общая по определению наука о Земле, должна главным образом заниматься исследованием структуры земного шара в целом и анализом происходящих в нем процессов. Фактически же геофизика имеет больше возможностей для решения относящихся к этой проблеме задач, и геофизики практически больше занимаются ими. Именно геофизика, геохимия и астрономия дают основные сведения о структуре глубинных зон Земли и земного шара в целом и, что еще важнее, геофизики, геохимики и астрономы уделяют гораздо больше внимания обобщению всех этих данных и построению соответствующих гипотез.

Вряд ли кто-либо из геологов станет возражать против того, что будущее геологии - в тесном единении с геофизикой и геохимией, однако на практике эти науки все еще разделены и недостаточно сотрудничают друг с другом. Между тем, очередные задачи настоятельно требуют самой тесной совместной работы, а может быть, и полного слияния. Такова, например, задача поисков и разведки ископаемых ресурсов. Пришло время оценить полные запасы полезных ископаемых не только в поверхностном слое, но и на значительных (10 - 20 км) глубинах. Необходимо овладеть методами «прогноза в пространстве», как говорят геологи, т. е. по существу методами анализа, основанного на данных о структуре и генезисе крупных участков земной коры и на теории, связывающей эти факторы с образованием месторождений полезных ископаемых.

Необходимо решить вопрос о термическом режиме земной коры и возможностях использования земного тепла. Настоятельно важно разобраться в явлениях вулканизма и землетрясений. Все эти проблемы, в конце концов тесно связаны и сливаются с единой проблемой развития ценного шара в целом и образования его нынешней структуры.

Положение, как мне кажется, таково: либо геология существенно изменит свое содержание и будет действительно широко пользоваться физико-математическими методами и химическим анализом процессов в земной коре, т. е., по существу, включит в себя геофизику и геохимию, либо решение основных задач, которые всегда ставила перед собой геология как в области познания структуры земного шара, так и в области поисков полезных ископаемых, перейдет постепенно к геофизике и геохимии.

Несколько лучше, в смысле сочетания старого описательного и нового - физико-математического - направлений, положение в морских исследованиях. Исследование моря построено в общем комплексно.

Океан равно важен и как источник ресурсов и как своеобразная среда, и сейчас его изучение находится в начале нового периода бурного развития<sup>1</sup>. Это связано с тем, что в недалеком будущем биологические ресурсы океана (не только рыба, но и водоросли и планктон) станут важным элементом в балансе природных богатств, а также с тем, что уже сейчас самые тонкие особенности его структуры приобрели существенное значение для действия надводного и подводного флотов.

Использование современных физических методов зондирования (например, акустики) дает настолько существенный эффект, что океанологи всех направлений охотно применяют их в своих исследованиях.

---

<sup>1</sup> Первый период расцвета океанографии относится к середине XIX в., когда в ней нуждался парусный флот.

Физико-математические методы анализа процессов, попытки построения количественных связей значительно шире применяются в изучении океана, чем в геологических исследованиях.

Еще лучше в рассматриваемом смысле обстоит дело с изучением атмосферы. Метеорология, как мне представляется, успешно перестраивается, «вбирая» в себя такие вновь появившиеся дисциплины, как физика атмосферы или динамическая метеорология.

Необходимо всячески поддерживать начавшийся процесс проникновения физико-математических и химических методов, методов количественного анализа в исследование стихийных процессов. Это должно быть не просто сотрудничество разных наук в решении одной проблемы, а быстрое и сознательное преобразование ранее описательных наук в науки точные и сближение вплоть до полного слияния наук за счет подтягивания старых описательных дисциплин к новым, пользующимся методами точного анализа.

Другой важной тенденцией в развитии наук о Земле, по моему мнению, является техническое перевооружение исследований. Основным материалом для исследований служат фактические данные, характеризующие состояние природной среды в различных точках пространства и в различные моменты времени. Для того, чтобы выявить какую-либо закономерность, необходимо собрать огромное количество фактов. Обилие материала, привлекаемого для исследования, - характерная черта наук о Земле. Она наложила существенный отпечаток на развитие этих наук, на всю их работу. Немудрено, что иной раз методика наблюдений или обработки результатов становилась чуть ли не основным содержанием той или иной дисциплины.

По мере того, как практика заставляет нас учитывать, а следовательно, наблюдать, анализировать, изучать все более тонкие особенности среды, неизбежно огромными темпами растет количество используемого и перерабатываемого в процессе исследования материала. Поэтому переход на современную технику наблюдений, а также обработки и анализа материала представляется весьма важным. Автоматизация наблюдений и обработки начинает внедряться в практику метеорологических исследований и метеорологической службы. В настоящее время уже имеется реальная возможность автоматизировать весь цикл типовых метеорологических и многих геофизических измерений. Так, измерения, выполненные автоматической метеорологической станцией, могут передаваться по телеметрической линии прямо на вход электронно-вычислительной машины, которая перерабатывает их, сравнивает показания различных станций, выявляет и устраняет ошибки, анализирует и выдает результаты в виде обзоров, синоптических карт и прогнозов, а также накапливает результаты измерений в архиве.

Этот архив допускает в последующем анализ сведений в самых различных аспектах, например, сопоставление друг с другом одновременно множество рядов, характеризующих протекание различных процессов. Только полностью автоматизированная система позволит использовать огромное множество фактических данных, поступающих от спутников, которые скоро станут систематическими источниками геофизической информации.

Если в исследовании атмосферы и в исследовании космического пространства автоматизация измерений, обработки и анализа уже применяется на практике и быстро развивается, хотя далеко еще не использует имеющихся возможностей, то в некоторых других разделах наук о Земле положение хуже. Так, совершенно недостаточно автоматизирован цикл геофизических исследований в области поисков и разведки полезных ископаемых и исследований структуры земного шара.

Высказанные выше соображения относятся к некоторым важным и общим для разных дисциплин изменениям в характере их работы.

Теперь обратим внимание на некоторые актуальные задачи.

Использование природных богатств - основная линия во взаимодействии человека и природы. Точный учет природных ресурсов с целью их наиболее эффективного использования - одна из важнейших задач науки в этом плане.

В настоящее время треть человечества развивается в условиях социалистического общества, важной особенностью которого является строгое и комплексное планирование всей своей деятельности. Другую треть составляют народы, недавно освободившиеся от колониальной зависимости, которые стараются планировать свое развитие, заимствуя в этом отношении опыт социалистических государств. Попытки планирования своей деятельности можно наблюдать и в развитых капиталистических странах, несмотря на то, что их природа противоречит самому принципу комплексного планирования. Так или иначе, уже значительная часть человечества ведет или, по крайней мере, старается вести, плановое хозяйство. Не за горами переход всего человечества на социалистический путь развития, а следовательно, и охват научно организованным плановым хозяйством всей Земли. Надо учесть, что общее планирование и совместное разумное использование природных ресурсов всей планеты может стать реальным и до этого, оно в принципе возможно в условиях развитого международного сотрудничества и разоружения, исключая угрозу мировой войны.

Все это с полной очевидностью ставит важнейшую и срочную задачу - дать в ближайшее время полные, исчерпывающие сведения о всех природных ресурсах нашей планеты и предложении по их эффективному использованию, с учетом необходимости возобновления восстанавливаемых ресурсов и наиболее целесообразного расходования ископаемых и других невозобновляемых природных богатств.

Перед советской наукой эта задача уже поставлена Программой партии. Как мы на нее отвечаем? Советские геологи и геофизики за последние десятилетия сделали очень многое. Запасы полезных ископаемых на территории СССР выросли во много раз и до сих пор их рост в общем обгонял рост потребностей. Однако в некоторых конкретных случаях запасов не хватает для намеченного плана развития народного хозяйства. Большое значение имеет и своевременность в деле открытия полезных ископаемых. Так, открытие нефти в Сибири 10 – 15 лет тому назад позволило бы сберечь большие средства и правильнее спланировать развитие народного хозяйства. Плановое хозяйство требует наличия полных данных о природных ресурсах в период составления плана, а мы лишь собираемся получить их во время выполнения намеченных планом работ.

Это означает, что в ближайшее десятилетие должен быть сделан серьезный рывок в разведке полезных ископаемых, в разработке всевозможных методов оценки их запасов не только в ныне доступном тончайшем слое земной коры, Должен быть в принципе решен вопрос, что можно ожидать на больших глубинах. Теперь это уже не теоретический вопрос.

Минеральное сырье - наиболее простой вид природных ресурсов. Нужно знать, сколько его есть, для того чтобы использовать наиболее эффективно. Иначе обстоит дело с возобновимыми ресурсами. Используя почву, пресную воду, атмосферу, лес, биологические ресурсы, мы нуждаемся не только в оценке запасов. Воздействуя на связанные друг с другом естественные процессы, мы прежде всего должны точно учитывать как прямые, так и косвенные результаты этого воздействия.

Мы, как правило, представляем себе в общих чертах (хотя далеко не всегда), что будет с эксплуатируемым источником природных богатств и в какой мере его можно использовать, обеспечивая воспроизводство.

Так, специалисты лесного хозяйства могут оценить размер и характер ежегодной вырубki, не приводящей к истреблению данного лесного массива, а ихтиологи - рассчитать размеры целесообразного вылова рыбы определенных видов. Гидрологи с достаточной точностью рассчитают водный баланс регулируемой части бассейна реки и определяют возможности использования его запасов.

Однако мы еще очень плохо учитываем весь комплекс изменений, производимых в природной среде в результате нашего вмешательства. Мы опять должны вспомнить, что совокупность всех природных процессов образует систему, находящуюся в подвижном равновесии. Всякое изменение одного из элементов этой системы неминуемо влечет за

собой какие-то изменения в других. (Всем известно, например, что вырубка леса влияет на сток рек). Иногда эти изменения, переходя из одного процесса в другой, ослабевают. Однако в системе природных процессов возникают по временам связи типа управления, а тогда небольшое изменение в одном из них может бурно развиваться при переходе в следующий.

Так, очень сложные цепи связывают физические и биологические явления, развивающиеся в масштабе природных процессов. Своеобразные «вспышки» популяции животных или растений свидетельствуют о том, что совокупность некоторых процессов может испытывать значительные флуктуации и в иных случаях переходит в иное положение подвижного равновесия. Конечно, эти цепи управления, в отличие от тех, что имеются в живых организмах или в машинах, сами неустойчивы, - они возникают по временам, а затем распадаются, но их временное существование имеет существенную важность.

Мы представляем в общем виде схему взаимодействия природных процессов, действующих на поверхности Земли, в океане и атмосфере, но наши сведения о количественных соотношениях в этих связях и в особенности о связях типа управления пока еще отрывочны и примитивны. Таким образом, мы воздействуем на природу, но в то же время еще плохо понимаем, каковы будут проистекающие от этого следствия и, как правило, не считаемся с ними.

Поскольку размеры нашего вмешательства в природные процессы достигли большой величины и будут расти в дальнейшем, задача тщательного учета его эффектов становится весьма актуальной. Она в особенности сложна в процессах, включающих деятельность биосферы. Вместе с тем нынешний технический уровень является практической основой возможности целенаправленного изменения природной среды, развития и повышения эффективности природных богатств в крупных масштабах.

Повышение продуктивности производится в настоящее время на ограниченных, выделенных из общей среды участках, на культивируемых полях, в прудах, где развивается рыбное хозяйство и т. д. Однако возможности, представляемые современной техникой, позволяют подойти столь же хозяйственным образом к природным ресурсам, рассматриваемым в масштабе всей нашей планеты.

Так, можно ставить задачу об организации рыбного хозяйства в масштабе всего мирового океана, о преобразовании в крупных масштабах растительности и т. д.

Использование связей типа управления и неустойчивых состояний природных процессов открывает возможность активного воздействия на стихийные явления. На этом основаны, например, первые, пока еще скромные успехи, достигнутые в активном воздействии на облака и осадки. Используя неустойчивые состояния метеорологических процессов и наличие связей типа управления, удастся рассеивать облачность, получать в небольших количествах осадки, предотвращать в отдельных случаях развитие грозы и града.

Затрачивая ничтожные количества веществ, используемых для стимулирования реакций, оказывается возможным вызывать процессы, в которых преобразуется из одной формы в другую или перемещается в пространстве значительные количества энергии.

Хотя воздействие на облака и осадки успешно осуществляется пока лишь в очень узком диапазоне условий, метеорология уже ставит задачу оценки возможностей изменения климатических условий. Установленная изменчивость в крупных метеорологических и гидрологических процессах большой длительности, их тесное взаимодействие друг с другом и весьма вероятная неустойчивость, позволяют, как полагаю, надеяться, что удастся отыскать и в комплексе климатообразующих факторов подходящие каналы управления, доступные нашему воздействию.

Таковы некоторые соображения о развитии исследований, направленных на решение второй актуальной задачи наук о Земле, - разработки методов активного воздействия на стихийные явления.

Коммунистическому обществу посильны и необходимы мероприятия по коренному улучшению природных ресурсов. Это одна из сторон предусмотренной еще Марксом задачи по переустройству мира. Она указана в Программе партии, утвержденной XXII съездом КПСС и должна занять достойное место в советской науке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М. И. Некоторые пути воздействия на климат. «Метеорология и гидрология», 1962, № 2, стр. 3 - 8.
2. Попов А. Я. Современное мальтузианство. М., Изд-во ИМО, 1960.
3. Brown H. The Human Spirit Needs Space. «Saturday Review», 1962, February 17, p. 16.
4. Staley E. The Future of Undeveloped Countries. N. Y., 1954.
5. Маркс К. Письмо к Ф. Энгельсу от 25/III – 1868 г. В кн.: К. Маркс, Ф. Энгельс. Избранные письма. Госполитиздат, 1953, стр. 202.
6. Федоров Е. К. О влиянии атомных взрывов на метеорологические процессы. «Атомная энергия», 1956, № 5, стр. 103 - 112.
7. Энгельс Ф. Диалектика природы. Госполитиздат, 1955.
8. Кедров Б. М. О соотношении форм движения материи в природе. В кн.: «Философские проблемы современного естествознания. Труды Всесоюзного совещания по философским вопросам естествознания». М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 137 - 211.
9. Кедров Б. М. О классификации наук. «Вопросы философии», 1955, № 2, стр. 49 - 68.
10. Поспелов Г. Л. . О характере геологии как науки и ее месте в естествознании. «Изв. АН СССР, серия геол.», 1960, № 11, стр. 3 - 19.
11. Шанцер Е. В. Современная геология и ее место в естествознании, «Изв. АН СССР, серия геол.», 1961, № 10, стр. 21 – 35.

# **Радиоактивное загрязнение после ядерных взрывов и аварий - интегральный подход**

Ю. А. Израэль

*Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, г. Москва*

Естественная радиоактивность всегда существовала на нашей планете: она обусловлена изотопами тория, урана и калия и некоторыми продуктами их превращений.

С 1945 года - с начала осуществления ядерных взрывов - в природных средах появились радионуклиды антропогенного происхождения, нередко значительно превышающие по концентрации и энерговыделению естественную радиоактивность.

Дополнительная радиоактивность появлялась и в результате работы и аварий на атомных станциях и предприятиях.

За 50 лет наша планета стала существенно радиоактивней.

## **ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ**

Ядерные взрывы проводились США, СССР (см. таблицу 1, в которой указаны число проведенных в различных средах взрывов США и СССР). Большинство ядерных взрывов осуществлялись в испытательных или мирных целях. Они проводились практически во всех природных средах [1,2]. При атмосферных ядерных взрывах образуется огненный шар, а затем облако взрыва, поднимающееся на большую высоту, проникая при высокой мощности в стратосферу до высот 40 – 50 км; при подземных взрывах и авариях нередко образуется струя, состоящая из газообразных и летучих радиоактивных продуктов, истекающих из места взрыва (аварии) длительное время.

При выпадении радиоактивных частиц, формирующихся в огненном шаре и облаке из материала вовлеченного грунта и/или материала самой бомбы, на земной поверхности образуется радиоактивный след, простирающийся на сотни километров (ближний след или локальные загрязнения), тысячи километров (дальний след). Продукты, выброшенные в стратосферу, постепенно оседают на земную поверхность (в течение месяцев или даже лет), формируя глобальные выпадения, которые теряет форму следа от индивидуального взрыва.

Наибольшее радиоактивное загрязнение земной поверхности образуется при наземных (приземных) взрывах и подземных взрывах с выбросом грунта (см. таблицу 2); в таблице «приведенная» высота обозначена как  $\bar{H}$  (для воздушных взрывов), равная высоте взрыва  $H$ , поделенной на радиус огненного шара; для подземных взрывов «приведенная» глубина  $\bar{h}$ , обозначена в единицах  $\text{м/кт}^{1/3}$ , где кт - мощность взрыва в килотоннах;  $\delta$  - доля радиоактивности, выпавшей на ближнем следе.

Исследования радиоактивности после ядерных взрывов и аварий широко проводились в различных странах, в первую очередь, в США и СССР. В СССР по инициативе академиков И. В. Курчатова и Е. К. Федорова был организован для этих целей Институт прикладной геофизики, который с 1954 г. непрерывно осуществлял эти исследования (затем Институт глобального климата и экологии).



Таблица 1.

### Классификация ядерных взрывов

Тип взрыва	Среда, подвергающаяся загрязнению	Количество взрывов [2,3]	
		СССР*- 715 (в том числе в мирных целях - 124)	США - 1032** (в том числе в мирных целях - 27)
Наземный (поверхностный)	Тропосфера, земная поверхность	32	84 (+36 на баржах)
Воздушный	Стратосфера, тропосфера, земная поверхность	177	78
Высотный, космический	Стратосфера, околоземное космическое пространство	5	12
Подводный	Водная масса	5	5
Подземный (с выбросом грунта)	Литосфера, тропосфера, земная поверхность	5	9
Подземный глубокий (камуфлетный)	Литосфера	491	806

\* Помимо СССР и США ядерные взрывы проводили Великобритания (совместно с США), Китай, Франция, Индия и Пакистан.

\*\* Совместно с Великобританией - еще 24 взрыва.

Таблица 2.

### Ядерные взрывы

	$\bar{H} = H/R$	Доля $\delta$ на следе
Наземные (+ башенные)	$0 \leq \bar{H} \leq 0,2$	5 - 30%
Приземные (+ на барже; подводные вблизи от дна)	$0,2 \leq \bar{H} \leq 1$	1 - 5%
Воздушные (+ подводные вдали от дна)	$\bar{H} > 1$	0,1 - 1%
Подземные с образованием кратера	$\bar{h} < 40 - 50$ (м/кг <sup>1/3</sup> )	10 - 60%
Подземные камуфлетные (с образованием струи; аварийные)	$\bar{h} > 50$	< 1%

Результаты исследований радиоактивного загрязнения природных сред при ядерных взрывах изложены в многочисленных статьях и монографиях (см. [3,4] и др.), при подземных взрывах [5], при мирных взрывах в монографии [6].

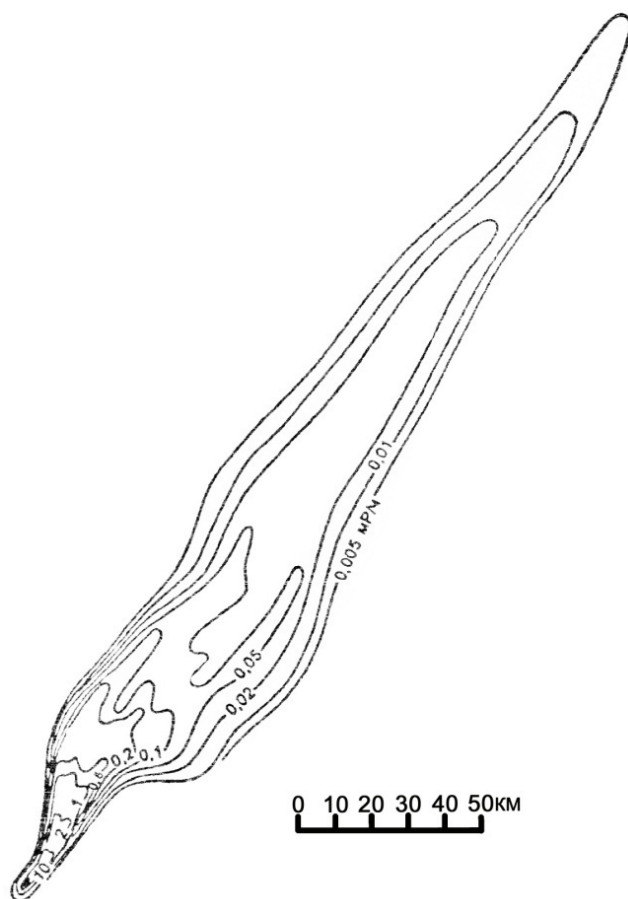


Рис. 1.

На рис. 1 показана характерная форма следа (распределение мощности доз) от неглубокого подземного взрыва («1003», СССР) и распределение  $^{137}\text{Cs}$  на следах 1953 и 1951 гг. (расположенного восточнее) на Семипалатинском полигоне (рис. 2. съемка 1991 г. по данным ГНПП «Аэрогеофизика» [3]); при развороте ветра форма следов может быть более сложной.

На рис. 3 показано, в качестве примера, распределение уровней радиации (интегральных характеристик) по оси следа - они после некоторого максимума, сдвиг которого от места взрыва зависит от его высоты - спадают с расстоянием по степенному закону.

Особенности загрязнения природных сред, радионуклидный состав загрязнения существенно зависит от процессов, протекающих в первые секунды после ядерного взрыва в огненном шаре и облаке взрыва.

При атмосферных взрывах, особенно при наземных, в огненный шар вовлекается большое количество грунта. Его частицы испаряются, плавятся, а затем, когда температура огненного шара снижается до 1700 К, затвердевают. На них происходит конденсация радионуклидов. Пока частицы находятся в жидкой фазе, радионуклиды диффундируют внутрь них, а когда они затвердевают, осаждаются и задерживаются на поверхности этих частиц.

Радиоизотопы конденсируются с разной скоростью, в соответствии с давлением насыщенных паров элементов, которыми представлены эти изотопы, над расплавленным материалом (в основном  $\text{SiO}_2$  или материалом самой бомбы).

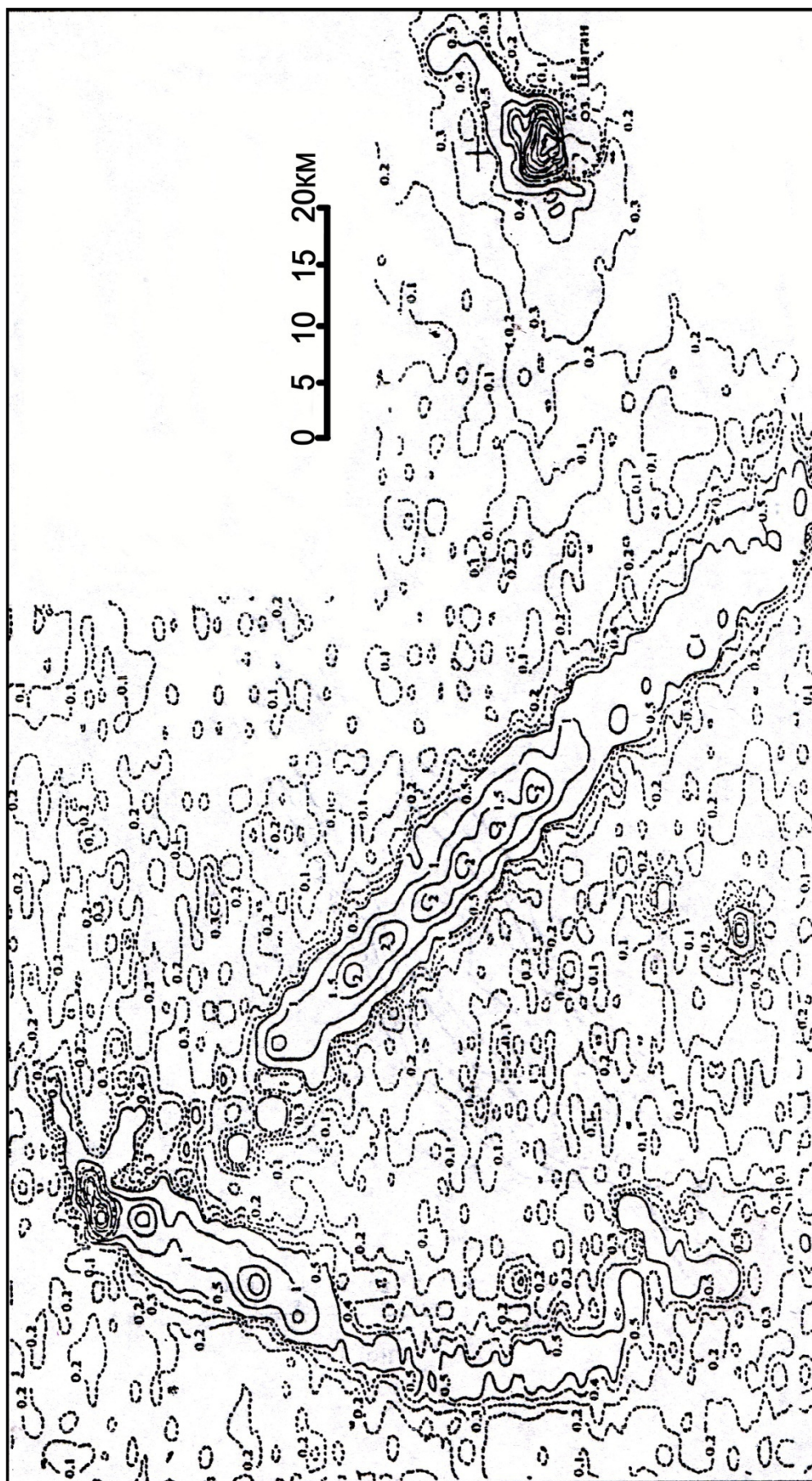


Рис. 2.

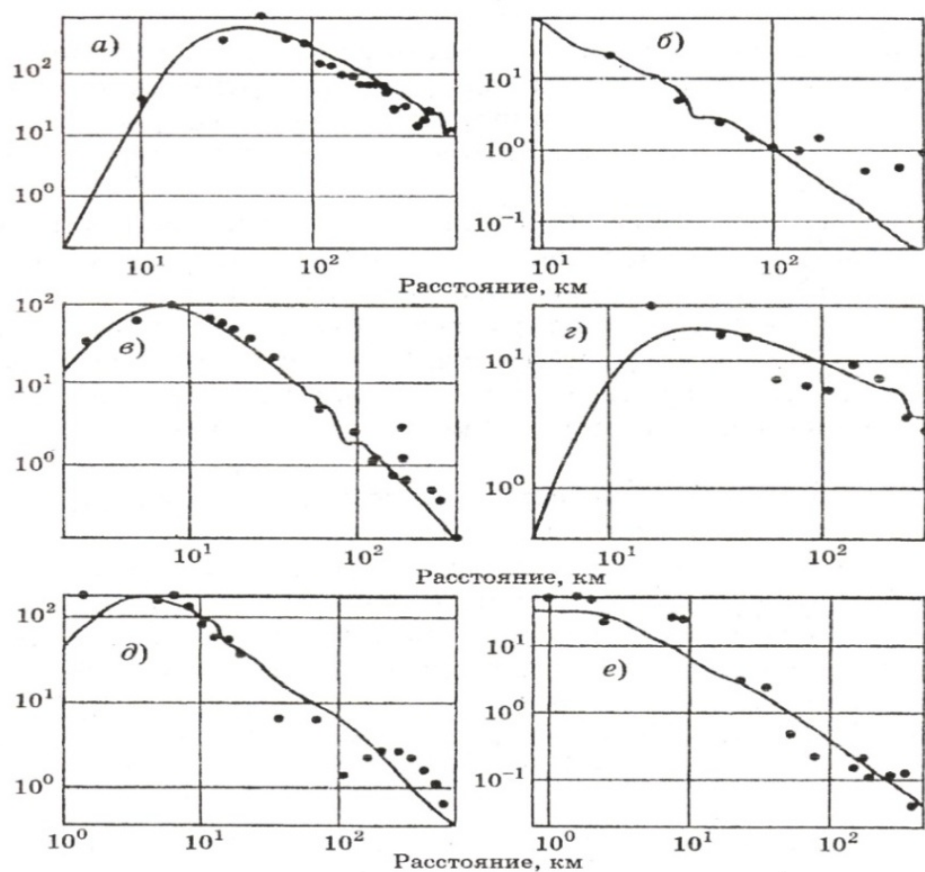


Рис. 3.

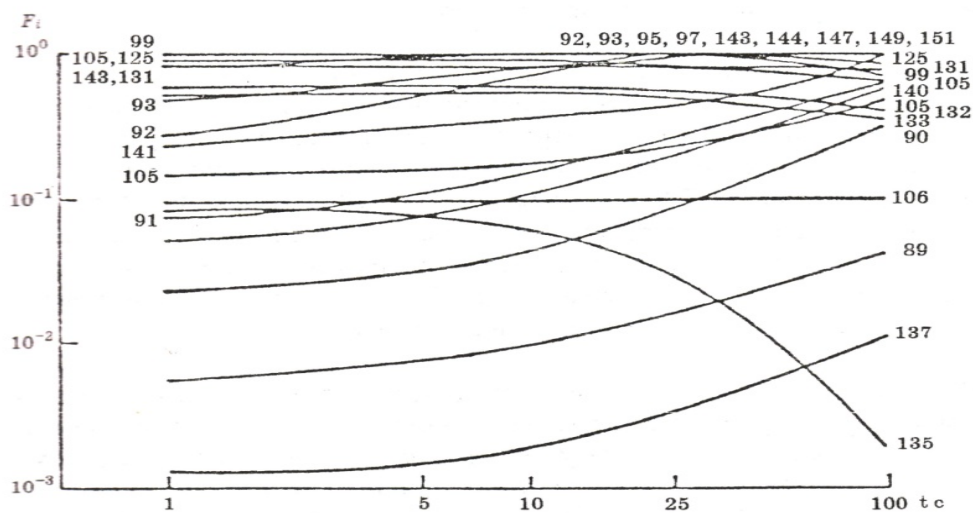


Рис. 4.

На рис. 4 показано, как с течением времени после ядерного взрыва изменяется в различных массовых цепочках (на рисунке приведены их номера) доля ядер, перешедших в конденсированную фазу  $\text{SiO}_2$ . По этим кривым можно рассчитать, каким из цепочек принадлежат те или иные радионуклиды в определенный момент времени после взрыва. Наиболее тугоплавкие элементы в первую очередь конденсируются на жидких частицах грунта и диффундируют внутрь частиц, а летучие элементы конденсируются позже, нередко уже после затвердевания частиц. Крупные аэрозольные частицы, покидающие



радиоактивное облако раньше, чем мелкие, обогащены тугоплавкими изотопами, а мелкие - летучими. В результате активации аэрозольных частиц у них образуется объемно-поверхностное загрязнение  $A(r) \sim r^n$ ,  $r$  — радиус частицы,  $2 \leq n \leq 3$ .

Время затвердевания частиц зависит от мощности взрыва нелинейно, например, при ядерном взрыве, эквивалентном взрыву 20 кт тротила, оно составляет 7 с, а при взрыве в 1 Мт — 40 с. Очевидно, что в различных массовых цепочках радионуклиды проходят стадии элементов с разной степенью летучести.

Например, предшественником стронция - 89 в массовой цепочке является инертный криптон - 89 с периодом полураспада  $T_{1/2}$  более 3 мин, а стронция - 90 — криптон - 90 с  $T_{1/2}$  33 с. Это означает, что при ядерных взрывах весьма опасные для всего живого радиоактивные изотопы стронция не проникают внутрь аэрозольных частиц, они ведут себя вначале как летучие элементы, осаждаясь преимущественно на поверхности мелких частиц. С этими частицами они распространяются на большие расстояния от места взрыва.

Иная картина наблюдается при аварии на реакторе, поскольку за длительное время работы в нем накапливаются долгоживущие радиоактивные продукты. В этом случае короткоживущая часть массовых цепочек для стронция - 89 и стронция - 90, большой роли не играет, и изотопы стронция ведут себя как тугоплавкие элементы. Отсюда понятно, почему при ядерных взрывах широко распространяется стронций - 89 и стронций - 90 (кстати, и цезий - 137, поскольку он летучий), а при ядерных авариях - в основном цезий - 137. Наш ранний прогноз о том, что практически весь стронций - 90 останется в ближней Чернобыльской зоне, оказался правильным.

Разная скорость конденсации элементов, а следовательно и радионуклидов, на аэрозольных частицах во время ядерного взрыва приводит к нарушению изотопных соотношений, возникающих в ходе ядерных реакций. Этот эффект определяет фракционирование радиоактивных продуктов. Отношение количества экспериментально полученных изотопов к их теоретическому значению, которое существует в реакторе (или при взрыве), называется коэффициентом фракционирования этих изотопов.

Коэффициенты фракционирования могут быть определены экспериментально или рассчитаны теоретически. Их величина зависит от того, какое количество радионуклидов попадает внутрь аэрозольных частиц при ядерном взрыве, а какое осаждается на их поверхности (это соотношение характеризуется функцией  $F_i$ , см. рис. 4). Можно рассчитать величину фракционирования для разного времени остывания огненного шара, а следовательно, для различных мощностей ядерного взрыва и соответственно разного времени затвердевания частиц.

Дальнейшая судьба (в том числе и миграция) радионуклидов, распределенных неравномерно в природных средах, зависит от их растворимости и биологической доступности. Разумеется, легче смываются радионуклиды, находящиеся на поверхности частиц, однако растворимость и таких радионуклидов невелика — 3 - 12%. При объемном распределении радионуклидов в частицах их растворимость меньше — 1 - 4%.

Миграция радионуклидов с подземными водами изучалась при нескольких ядерных взрывах, в том числе при взрыве 1003 (СССР). Исследование показали, что вследствие ионообменных реакций скорость потока радиоактивных изотопов, растворенных в воде, меньше скорости движения воды. Отношение этих скоростей характеризуется так называемым коэффициентом распределения. Для стронция он составляет  $10 - 2 \cdot 10^3$ , а для тугоплавких изотопов, например, церия, находящихся внутри аэрозольных частиц до  $10^5$ . Таким образом, миграция радионуклидов с подземными водами и смыв их с земной поверхности происходят медленно, что подтвердилось и после Чернобыльской аварии (это было спрогнозировано нами в начале мая 1986 г.). Так же медленно поступают некоторые радионуклиды в растения через корневую систему.

Как уже отмечалось, после ядерного взрыва (или аварии) на местности образуется вытянутая по ветру полоса загрязнений (след). Набор данных, полученных при измерении

следов ядерных взрывов, позволил создать модель их формирования, которая использовалась для прогноза загрязнений. Зная функцию распределения частиц по скоростям падения, дисперсию скоростей поперек следа, высоту источника в атмосфере и скорость ветра, можно, решив полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии [5], определить плотность радиоактивного загрязнения на земной поверхности.

Эту же модель можно использовать и при решении обратной задачи - реконструкции старых следов, то есть восстановления радиационной обстановки на время проведения испытаний, что сейчас весьма актуально для многих регионов России, в частности, Алтайского края, Томской и Новосибирской областей. При реконструкции старых следов используются архивные данные о метеорологической обстановке в момент взрыва и сведения о распределении на местности долгоживущих изотопов наведенной активности в основном кобальта - 60, европия - 152 и - 155, чтобы отделить радиоактивное загрязнение, связанное с конкретным взрывом, от того, которое обусловлено глобальными выпадениями [7].

За пределами ближнего следа формируются дальние и глобальные выпадения радионуклидов. Первые образуются в течение нескольких дней после взрыва. Своим появлением они обязаны частицам размером от 50 мкм и меньше, поднятым во время взрыва в тропосферу, хотя не исключены выпадения из стратосферы.

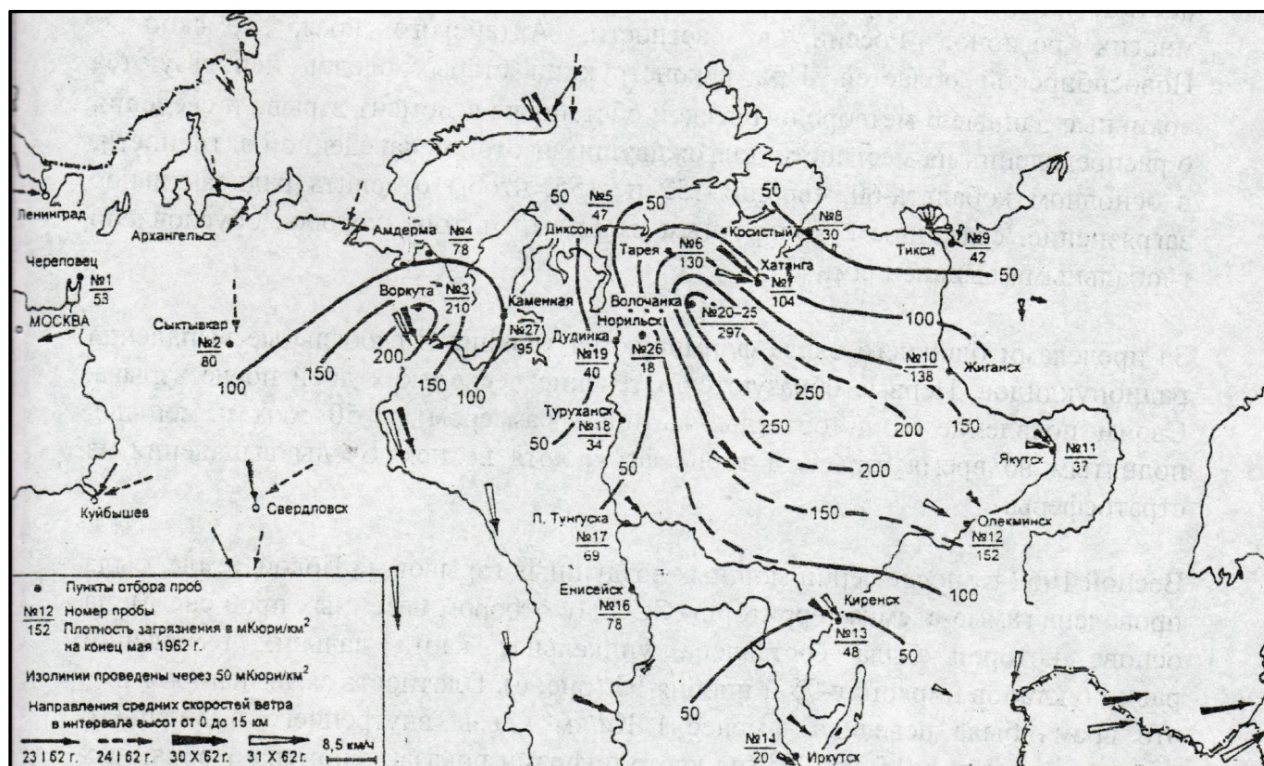


Рис. 5.

Весной 1962 г., после серии мощных воздушных взрывов на Новой Земле, была проведена гамма-съемка территории СССР (с отбором наземных проб снега), на основе которой была составлена уникальная карта дальних выпадений радионуклидов циркония - 95 и ниобия - 95 (рис. 5). Плотность загрязнения ими в это время была невелика - менее 1 Ки/км<sup>2</sup>, дозы внутреннего и внешнего облучения - менее 0,5 Бэр [3] (на карте цифрами показаны номера отобранные пробы снега, числитель, и плотность загрязнения <sup>95</sup>Zr + <sup>95</sup>Nb - в мк/км<sup>2</sup>, стрелками указаны средние направления ветра в слое 0 – 15 км в период взрывов).

Как уже отмечалось, глобальные выпадения формируются на протяжении многих недель, месяцев и даже лет после взрыва. За них ответственны радиоактивные частицы



субмикронного размера, заброшенные при мощных взрывах в стратосферу. Оседая на земную поверхность из стратосферы, радиоактивные частицы образуют вытянутые в широтном направлении полосы загрязнений. После подписания в 1963 г. Московского договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой интенсивность глобальных выпадений существенно снизилась, изотопный состав глобальных выпадений определяется долгоживущими радиоактивными продуктами, главным образом стронцием - 90, цезием - 137, цирконием - 95 и ниобием - 95. Построены карты глобальных выпадений в Северном полушарии. Несмотря на небольшую плотность загрязнения на поверхности, суммарная активность долгоживущих радионуклидов, формировавших глобальные выпадения до 1963 г., составляет десятки мекюри.

На рис. 6 показана карта глобальных выпадений (распределение запаса  $^{137}\text{Cs}$ ) на территории СССР, построенных специалистами Института прикладной геофизики в 1974 г. (на конец 60-х - начало 70-х годов) [14].



Рис. 6.

## АВАРИИ. ПОСЛЕДСТВИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ.

Известно несколько крупных аварий на атомных станциях и предприятиях. Крупнейшие из них произошли на Урале (1957 и 1967 гг.) и на Чернобыльской атомной станции (1986 г.), а также в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г. и на атомной электростанции в Три-Майл-Айленде (США) в 1983 г.

После Чернобыльской аварии на протяжении 10 дней наблюдалось истечение струи летучих и газообразных продуктов, накопившихся в реакторе за три года его работы. Истечение постепенно уменьшалось до пятого дня после аварии, затем увеличилось, потом стало резко уменьшаться и на десятый день после аварии прекратилось полностью. Исследованием самого источника занимались в основном сотрудники Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. Первые данные о нем содержатся в сообщении советских экспертов, подготовленном в 1986 г. для МАГАТЭ [8].

Метеорологическая обстановка в дни Чернобыльской аварии была сложной. В первый день наблюдалось движение воздушных масс на запад, затем на северо-запад, во второй день - на север и северо-восток, на четвертые сутки ветер стал разворачиваться на юг и юго-запад,

С первого дня аварии специалисты химических войск (в основном в радиусе 10 км от места аварии), Госкомгидромета (за пределами этой зоны на всей европейской территории бывшего СССР), а позже и других ведомств проводили гамма-съемку радиоактивного загрязнения атмосферы и местности наземными методами, а также с самолетов и вертолетов. Последние были оборудованы рентгенометрической, гамма-спектрометрической и пробоотборной аппаратурой. Результаты как оперативных, так и длительных регулярных обследований представлены в работах [3,9-13].

При первичном выбросе из реактора в атмосферу попало значительное количество радиоактивных аэрозольных частиц, включающих в себя как тугоплавкие, так и летучие продукты; из струи летучих продуктов на местности осаждались высокодисперсные аэрозоли, особенно интенсивно - с дождевыми осадками. После аварии было выброшено существенное количество радиоактивности - в среднем 1,6% общего количества на расстоянии до 40 км и 3,5% на европейской территории Советского Союза. Эти данные, полученные в результате аэрогамма-съемки и лабораторных анализов в институтах Госкомгидромета [9], вызвали сенсацию, так как многие специалисты первоначально считали, что из пострадавшего реактора должно быть выброшено значительно большее количество радиоактивности (вплоть до 100%).

По данным различных исследований, из разрушенного реактора на Чернобыльской АЭС выброшено: благородных газов - 100%, изотопов йода - от 20 до 60, теллура - от 10 до 60, цезия - от 9 до 33, летучих оксидов - 3,5 - 6,0, щелочноземельных элементов - 3,5 - 6,0, трансурановых элементов - 2 - 3,5, тугоплавких продуктов - 2 - 3,5%. Общий выброс суммы радиоактивных продуктов (на 6 мая 1986 г.) составил 3,5 - 5,0% [3,8].

Первая детальная карта (изолинии мощности экспозиционной дозы на высоте 1 м) загрязнения местности на расстоянии до 100 км от места аварии была построена 1 мая 1986 г. и на следующий день представлена Госкомгидрометом Правительственной комиссии. Ее построение было затруднено из-за присутствия постоянно меняющегося объемного источника (струи). Затем карты представлялись ежедневно. На картах четко выделяется западный след по изолинии 5 мР/ч, вытянутый на 75 – 85 км от места аварии, а также северный (его ширина 40 – 45 км - на 10 мая 1986 г.), южный и юго-западный. С территорий, оконтуренных изолинией 5 мР/ч, осуществлялась полная эвакуация населения, как и из 30 - километровой зоны. Площадь зоны эвакуации составила около 3000 км<sup>2</sup>, полного отчуждения (уровень радиации более 20 мР/ч на 10 мая 1986 г.) - до 1100 км<sup>2</sup> [11].

Помимо центральной, Чернобыльской, зоны высокого загрязнения аэрогамма-съемка выявила пятна повышенного загрязнения: Гомель – Могилев - Брянск (на севере), Тула - Орел (на северо-востоке) и зона, протянувшаяся с юга на юго-запад от места аварии. При съемке было установлено, что площадь с уровнем радиации более 0,2 мР/ч (на 10 мая 1986 г.) превысила 200 тыс. км<sup>2</sup> [3].

Радиоактивность распространилась на многие страны Европы. Общее количество <sup>137</sup>Cs на территории стран Европы, Европы в целом, СССР и Европейской части (ЕТС) СССР показано в таблицах 3,4 и на рис. 7. На рисунке видно резкое изменение <sup>137</sup>Cs на территории после 1986 г., когда к «глобальным» выпадениям добавились «чернобыльские».

Исследования обнаружили значительную пятнистость зон загрязнения. Это обусловлено особенностями метеорологической обстановки: интенсивными дождями в ряде мест, усиливавшими выпадение радиоактивных продуктов на местности. Особенно четко этот эффект проявился при образовании «цезиевых» пятен на территории



Белоруссии (в Гомельской и Могилевской областях), России (Брянская, Тульская области), Австрии, Германии, Италии, Швеции [10,11].

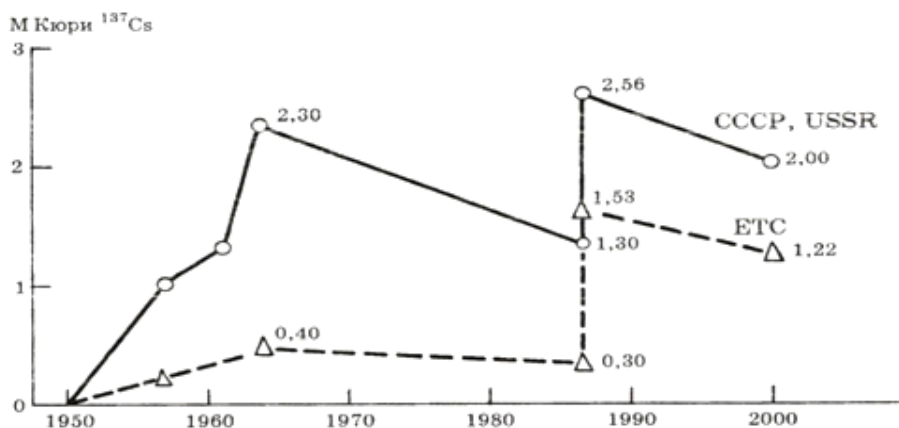


Рис. 7.

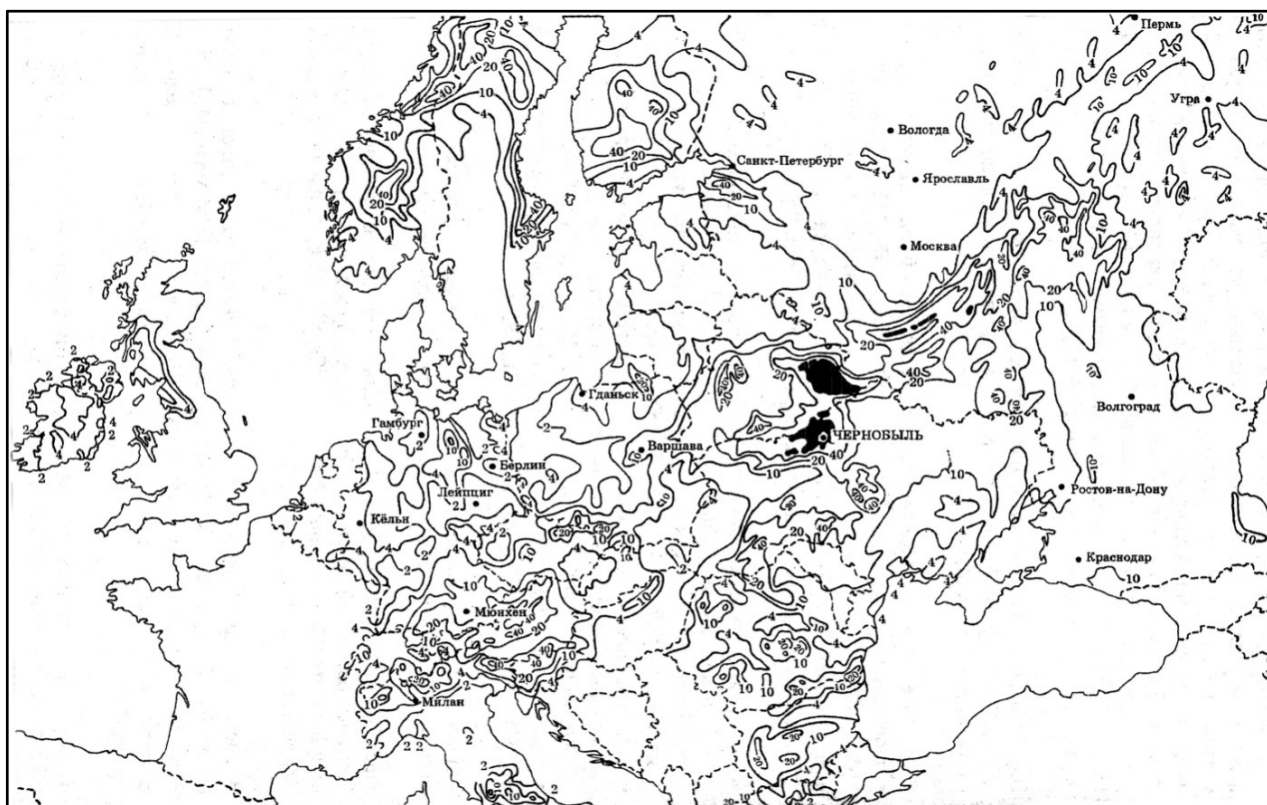


Рис. 8.

Это видно на карте загрязнения Европы цезием - 137 (рис. 8, изолинии - Бк/км<sup>2</sup>). В зоне «Чернобыльского» и «Могилевско – Гомельско - Брянского» пятен плотности загрязнения превышали 1480 Бк/м<sup>2</sup>.

Параллельно с аэрогамма-съемкой на загрязненной территории осуществлялся массовый отбор проб почвы, которые анализировались в лабораториях на различные радионуклиды.

В первые дни и недели по гамма - линиям были идентифицированы радионуклиды  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  [9]. В радиохимических лабораториях были идентифицированы  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Y}$ ; начаты

измерения альфа - излучения  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ . Несколько позже удалось идентифицировать  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Cm}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ,

Измеренные изотопы можно разделить по степени фракционирования, а значит и по летучести, на три группы:

- радиоизотопы с высокими коэффициентами фракционирования (летучие изотопы) -  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ;
- радиоизотопы с невысоким коэффициентом фракционирования, но на некоторых участках (особенно в южном направлении) отличающиеся по поведению от нелетучего  $^{95}\text{Zr}$  -  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Y}$ , иногда  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ;
- радиоизотопы, очень близкие по поведению к нелетучему Zr (тугоплавкие) -  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{239}\text{Np}$ , иногда  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

В различных направлениях наблюдался различный радионуклидный состав загрязнения, что привело к различным дозовым нагрузкам (см. табл. 5).

Еще больший эффект фракционирования наблюдался на так называемых цезиевых пятнах (Гомельская, Могилевская, Брянская, Тульская области), где коэффициенты фракционирования  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  по отношению к  $^{95}\text{Zr}$  достигают сотен единиц и более.

Таблица 3.

#### Площади с уровнем загрязнения цезием - $^{137}\text{Cs}$ более 1 Ки/км<sup>2</sup> в различных странах Европы

Страна	Площади (в тыс. км <sup>2</sup> ) для диапазонов значений плотности загрязнения (в Ки/км <sup>2</sup> )				Выпадения цезия - $^{137}\text{Cs}$	
					Чернобыльские	
	1 - 5	5 - 15	15 - 40	> 40	МКи	%
Россия (европейская часть)	52,2	5,9	2,2	0,46	0,52	30
Украина	33,3	3,6	0,73	0,56	0,31	18
Белоруссия	29,7	9,4	4,4	2,6	0,4	23
Швеция	23,4	0,01	-	-	0,079	4,6
Финляндия	19	-	-	-	0,083	4,8
Норвегия	7,18	-	-	-	0,053	3,1
Австрия	11,1	-	-	-	0,042	2,4
Европа	185	20	8,1	2,8	1,72	100

Таблица 4.

#### Оценка выпадений $^{137}\text{Cs}$

	Общее количество $^{137}\text{Cs}$		Чернобыльский $^{137}\text{Cs}$	
	РВq	МКи	РВq	МКи
Европа	84	2,3	64	1,72
Земной шар (Европа + 20%)			76,8	2,06

**Средняя доза от внешнего гамма-излучения на местности, приведенная к значению мощности дозы 1 мР/ч на Д + 15\* для разных районов радиоактивного следа**

Сектор	Доза от всей суммы		Доза от цезия-137, Р	
	от Д + 1 до 1 года	от 1 года до 50 лет	от Д + 1 до 1 года	от 1 года до 50 лет
«Север»	2,5	8,1	0,25	7,2
«Юг»	2,3	2,4	0,066	1,9
«Запад»	2,3	4,6	0,13	3,9

\* Д + число дней после аварии

В настоящее время изданы Атлас радиоактивного загрязнения цезием - 137 различных районов Российской Федерации, Украины и Белоруссии [13], а также Атлас загрязнения чернобыльским цезием - 137 территории Европы в целом [12]. В таблице 4 приведены данные о суммарном загрязнении территорий цезием - 137.

Что касается загрязнения местности изотопами плутония - 239 и - 240, то данные 1986 и 1990 гг. хорошо согласуются между собой, хотя в 1986 г. об этих изотопах было известно немного. Распространение их ограничилось практически зоной отчуждения, близкой по своей конфигурации к 30 - километровой зоне.

На картах загрязнения стронцием - 90 изолиния 3 Ки/км<sup>2</sup>, принятая в 1986 г. в качестве «предельно допустимой», незначительно выходит за пределы 30 - километровой зоны [11, 13].

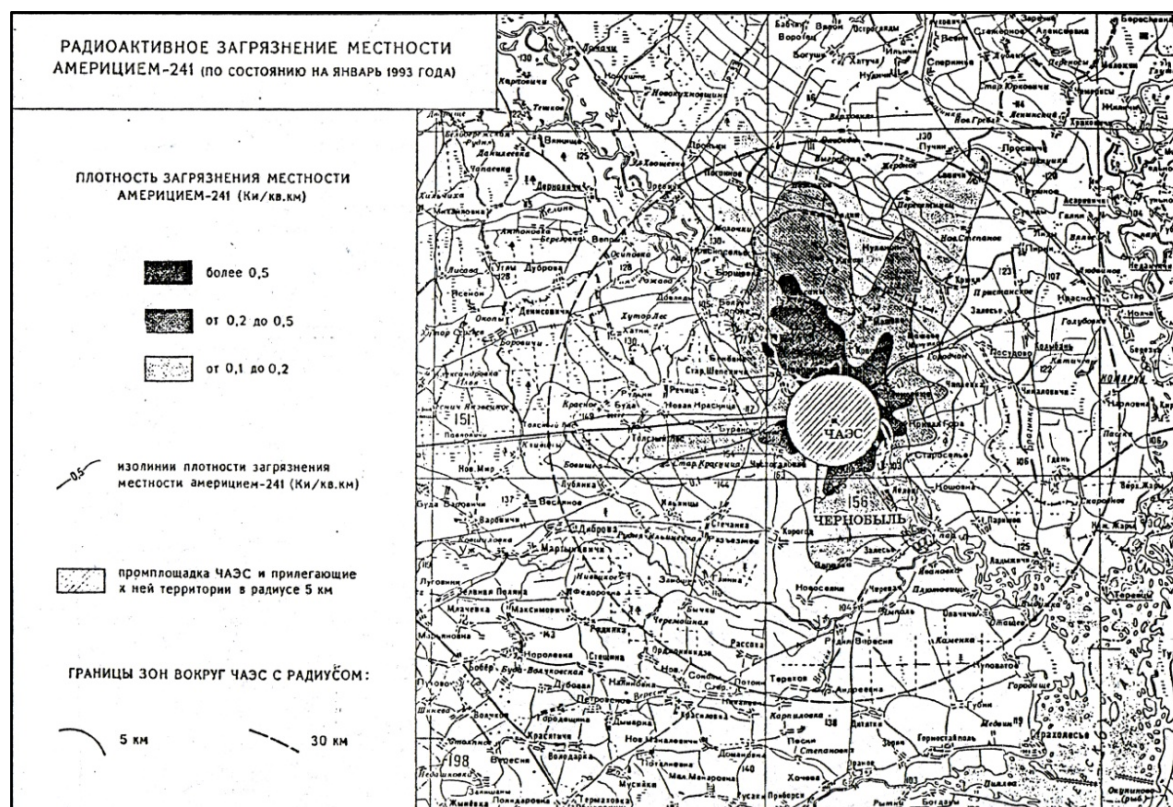


Рис. 9.

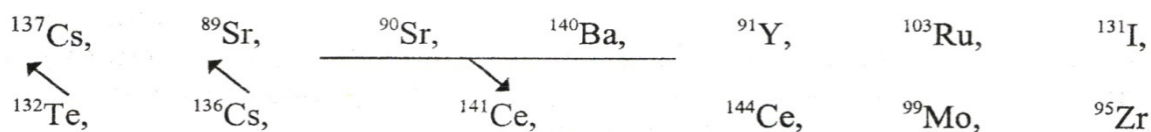
В первые дни после аварии по данным метеостанций была составлена карта-схема загрязнения местности йодом - 131 [3]. Поскольку этот изотоп весьма летуч, карта отражает лишь часть дозовой нагрузки йода - 131, полученной населением.

На рис. 9 показана карта загрязнения местности  $\alpha$  - излучением америция – 241, активность которого возрастает и сейчас [13].

Все описанные данные измерений позволили с большой точностью рассчитать дозовые нагрузки на население в загрязненных зонах, принять необходимые меры для защиты в начальной фазе аварии и в последующие периоды.

Важно здесь показать, в чем схожи и чем различаются последствия ядерных взрывов и ядерных аварий. И для взрывов, и для аварий характерна масштабность загрязнения летучим цезием - 137. При ядерных взрывах исключительную роль в загрязнениях играют короткоживущие радионуклиды, при авариях, в основном, - долгоживущие.

Приведем ряд радионуклидов, образующихся во время подземного ядерного взрыва с выбросом грунта, расположив их по степени летучести:



Стрелками здесь показаны изменения в положении некоторых радионуклидов при аварии на Чернобыльской АЭС: радионуклиды йода - 131, теллура - 132, цезия - 136 были весьма летучими, а стронция - 89 и - 90, наоборот, значительно менее летучими.

В заключении отметим, что в процессе многолетних исследований радиоактивного загрязнения природных сред при ядерных взрывах и авариях были получены следующие важные результаты:

- разработаны методы наземной и авиационной рентгенометрической и гамма-спектрометрической съемок загрязнения атмосферы и местности;
- показана возможность использования полученных закономерностей загрязнения и метеорологических данных для прогнозирования плотности радиоактивных загрязнений в ближней и дальней зонах;
- изучены закономерности распределения радионуклидов на местности;
- установлены закономерности фракционирования и возможность прогнозирования поведения радионуклидов при взрывах, а впоследствии и авариях. Определена разница в поведении ряда важных радионуклидов (при формировании аэрозольных частиц и их распространения, например,  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$ );
- изучен переход радионуклидов в воду - с учетом распределения радиоактивности на частицах, что привело к возможности прогнозирования загрязнения поверхностных вод и биологической доступности при взрывах и авариях;
- изучена миграция радионуклидов с подземными водами, поверхностными водами, и на местности;
- получен богатейший экспериментальный материал, который был с успехом использован для выявления радиационной опасности и уменьшения негативных последствий при взрывах и тяжелых атомных авариях, для принятия важнейших решений. В частности, убедительные данные о загрязнении, особенно глобального характера, способствовали заключению Московского договора 1963 г. о запрещении ядерных испытаний в атмосфере, космическом пространстве и под водой.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях в СССР, 1949-1990. Издание Минатомэнерго и МО РФ под рук. В. Н. Михайлова, 1996.
2. United States Nuclear Tests. July 1945 through Sept. 1992, DOE/NV-209 (Rew.14). Dec. 1994.
3. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс - погода, 1996.
4. Nuclear Test Explosions. Environmental and Human Impacts. Scope 59, Ed F. Warner and R Kirchmann, J. Wiley and Sons, 2000.
5. Израэль Ю. А., Петров В. П., Прессман А. Я., Ровинский Ф. Я., Стукин Е. Д., Тер-Сааков А. А. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы прогнозирования. Л. Гидрометеиздат, 1970.
6. Израэль Ю. А. Мирные ядерные взрывы и окружающая среда. Л., Гидрометеиздат, 1974.
7. Израэль Ю. А., Стукин Е. Д., Цатуров Ю. С. О возможности идентификации радиоактивных следов ядерных взрывов и реконструкции доз облучения населения с использованием анализа долгоживущих радионуклидов. Метеорология и гидрология, 1994, № 12, с.5-14.
8. Абагян А. А., Израэль Ю. А., Ильин Л. А., Легасов В. А. и др. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ/У Атомная энергия. 1986. Т. 61. В. 5. С. 301-320.
9. Израэль Ю. А. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1987. № 2. С. 5 - 18.
10. Hohenemser Ch., Renn Or. Chernobyl's other Legace // Environment. 1988. V. 30. № 3. P. 4-1L 40-45.
11. Чернобыль: Радиоактивное загрязнение природных сред /Под ред. Израэля Ю. А. Л. Гидрометеиздат, 1990.
12. Atlas of Caesium Deposition on Europe After the Chernobyl Accident. London: Lovell Jons Ltd, 1998.
13. Атлас. Радиоактивное загрязнение европейской части России, Белоруссии и Украины /Гл. ред. Израэль Ю. А. М.: Росгидромет, Роскартография, 1998
14. Болтнева Л. И., Израэль Ю. А., Назаров И. М. и др. Глобальное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и доза внешнего облучения на территории СССР. - Атомная энергия, 1977, т. 42, стр. 355.

## **Основные направления, методология и результаты исследований верхней атмосферы, ионосферы и околоземного космического пространства с использованием активных экспериментов**

С. И. Авдюшин, В. В. Алпатов, Н. В. Ветчинкин, Н. Н. Петров, Ю. А. Романовский

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail:alpatov@mail.ru*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Методология проведения активных экспериментов (АЭ) сложилась на опыте ракетных и спутниковых экспериментов, проведенных в свое время в мире и в СССР.

Основные исследования в СССР с использованием АЭ были выполнены в рамках комплексной программы «Активные эксперименты и антропогенные эффекты в ионосфере». В реализации программы принимали участие научно-исследовательские организации Академии наук, Высшей школы и ряда отраслевых министерств. Научное руководство и организацию работ по программе осуществлял ИПГ имени академика Е. К. Федорова, а ответственным исполнителем работ являлся Ю. А. Романовский.

В рамках этой программы была осуществлена обширная программа ракетных экспериментов, а также ряд экспериментов на космических аппаратах.

Основу экспериментальной программы составили активные эксперименты с инжекцией газо-дисперсных смесей, плазмообразующих составов и пучков частиц, проведенные с использованием ракет МР - 12 и МР - 20 на среднеширотном полигоне, а также на научно-исследовательских судах «Профессор Визе» и «Профессор Зубов» в различных районах земного шара – в экваториальной и авроральной областях, а также в области Бразильской геомагнитной аномалии. Это обстоятельство позволило исследовать особенности искусственной модификации околоземной среды (ИМОС) в областях, обладающих рядом аномальных особенностей по отношению к среднеширотной ионосфере.

Программа исследований ИМОС была реализована в виде нескольких экспериментальных проектов.

Проекты ракетных экспериментов включали следующие типы:

- проект «Искусственные облака», предназначенный для исследования ИМОС при создании искусственных облаков в результате инжекции плазмообразующих и плазмогасящих составов с использованием генераторов различного типа;

- проект «Аэлита», в рамках которого изучалась ИМОС при инжекции мощных стационарных и модулированных плазменных струй;

- проект «Ариэль», в котором исследовались особенности ИМОС при импульсной инжекции мощных плазменных сгустков;

- проект «Вертикаль», в рамках которого изучалась фотохимические процессы, протекающие при инжекции нейтрального газа в атмосферу.

В общей сложности в рамках программы было осуществлено 36 экспериментов на ракетах МР с созданием искусственных образований (ИО) в ионосфере и 24 эксперимента с инжекцией плазмы. Проведение однотипных в аппаратурно-методическом отношении

экспериментов позволило получить однородные и сопоставимые массивы данных по особенностям ИМОС в различных геофизических условиях и областях.

Основная часть ракетных экспериментов была проведена на исследовательском полигоне, созданном на базе средств ракетного зондирования атмосферы (СРЗА) в п. Капустин Яр. Комплексные исследования процессов и явлений в областях искусственной модификации, проводившиеся с использованием прямых контактных методов, а также дистанционными оптико-радиофизическими методами с привлечением аппаратных комплексов, располагавшихся как на территории исследовательского полигона, так и за его пределами, позволили получить экспериментальные данные, необходимые для анализа физики ИМОС.

Программа спутниковых экспериментов включала:

- Исследования эволюции искусственных ионных облаков на высотах  $h = 400 - 500$  км. в экспериментах по американскому проекту CRRES;
- Наблюдения искусственного дисперсного облака, созданного с борта станции "Мир" в эксперименте "Болид";
- Наблюдения искусственного газо-дисперсного облака в эксперименте "Мираж" на ИСЗ "Космос - 1809";
- Диагностика на спутнике "Космос - 1809" эффектов, вызванных воздействием на ионосферу мощного КВ-излучения [1].

Результаты спутниковых экспериментов существенно дополнили данные ракетных экспериментов, поскольку в условиях экспериментов на КА (высокая скорость, большие высоты) при создании искусственных образований возникают эффекты, которые не могут существовать в ракетных экспериментах.

## 1. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ И АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для обеспечения исследований ИМОС, были разработаны методики и аппаратные комплексы, обеспечивающие получение экспериментальных данных, необходимых для изучения различных научных и прикладных аспектов ИМОС. Эти работы включали:

- Разработку методов и бортовых аппаратных комплексов для ИМОС при инжекции в ионосферу с борта ракет и спутников газо-дисперсных смесей, плазмы и пучков заряженных частиц,
- Разработку методов и аппаратных комплексов для прямых измерений локальных возмущений при ИМОС и дистанционной оптико-физической диагностики ИМОС.
- Проведение лабораторных и стендовых измерений параметров инжектируемых газодисперсных смесей плазмы и пучков частиц,
- Осуществление широкомасштабной программы экспериментальных исследований ИМОС на ракетах и спутниках в различных районах земного шара.

При этом была разработана базовая методология создания и исследования ИМОС, которая может быть положена в основу предполагаемого дальнейшего развития данного научного направления.

Остановимся на некоторых особенностях этой базовой методологии. Значительная пространственная и временная изменчивость параметров искусственно модифицированной среды предъявляет ряд специфических требований к аппаратно-методическому обеспечению экспериментов, основные из которых состоят, в следующем:

- необходимость комплексных локальных (непосредственно в области воздействия и вблизи нее) контактных измерений различных параметров среды в

сочетании с дистанционными наблюдениями и измерениями области возмущения в ближней и дальней зоне;

- обеспечение многопозиционных измерений, как непосредственно в зоне воздействия, характеризующейся значительными пространственными градиентами параметров среды, так и в областях, в которых происходит релаксация и распространение возмущений;

- использование высокоскоростной многоканальной аппаратуры для параллельных измерений быстро изменяющихся характеристик возмущенной среды;

- разработка методов реконструкции областей ИМОС с использованием данных комплексных исследований;

- обеспечение автоматизированной обработки и комплексного анализа результатов экспериментальных исследований.

Сформированный подход к аппаратурно-методическому обеспечению экспериментов был осуществлен при организации специального полигона для исследования ИМОС, организованного на базе станции ракетного зондирования М202 в п. Капустин Яр.

С учетом конкретных задач отдельных типов экспериментов было разработано несколько типов унифицированных диагностических модулей и оснащенных ими головных частей ракет МР - 12 и МР - 20, которые оснащались бортовыми генераторами и инжекторами и диагностической аппаратурой. При проведении экспериментов на ракетах для изучения пространственно-временных эффектов при ИМОС было разработано несколько вариантов методики ракетных экспериментов. Так, в первом варианте для обеспечения локальных пространственных измерений параметров ИМОС проводилось отделение источника возмущения, пиротехнических генераторов или плазменных ускорителей, от ракеты вперед по направлению ее движения. При достижении заданного расстояния (10 – 500 м) производилось включение ускорителя или срабатывание генератора.

В другом варианте методики от ракеты вперед по движению отделялся дополнительный диагностический блок, оснащенный телеметрической системой, а источник возмущения находился на борту ракеты с дополнительной системой телеметрии. При этом производились измерения параметров возмущенной среды в двух точках - непосредственно в области воздействия и на различных расстояниях от нее.

В третьем варианте методики от ракеты с источником воздействия отделялись диагностические модули с автономными телеметрическими системами: один по направлению движения и два перпендикулярно ему, противоположно друг другу. При этом осуществлялась четырехпозиционная диагностическая схема, которая обеспечивает пространственную диагностику области возмущения.

#### 1.1. НАЗЕМНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Наземные диагностические средства предназначены для определения пространственно-временных параметров и оптико-радиофизических характеристик ИМОС.

Изучение оптических характеристик ИМОС требует осуществления ряда принципиальных требований при разработке аппаратуры и методики наблюдений, таких как:

- обеспечение комплексных измерений (телевизионных, спектральных, фотометрических) оптических характеристик ИМОС, так как только сочетание разных методов дает возможность получить достоверные данные о спектрально-яркостных параметрах двумерных изображений ИМОС;



- проведение многопозиционных (не менее трех пунктов) наблюдений ИМОС;

- создание методики компьютеризованной комплексной обработки результатов оптических наблюдений, которая бы, с одной стороны, позволяла формализовать и объективизировать процесс обработки, и с другой стороны - использовать новые методы анализа и реконструкции ИМОС;

- проведение комплексного анализа результатов наблюдений и модельных оценок ИМОС для разработки и коррекции его оптической модели, которая позволяет исследовать процессы, определяющие структуру, динамику и свечение ИМОС, а также прогнозировать оптические характеристики ИМОС на разных этапах его эволюции.

Особенности наблюдений ИМОС предъявляют ряд специфических и иногда взаимно исключающих требований к диагностической аппаратуре. К основным требованиям наблюдений ИМОС необходимо отнести следующие:

- высокая чувствительность ( $1 \div 10$  релей для спектрофотометров и  $10^{-7}$  лк для телевизионной аппаратуры);

- значительный динамический диапазон ( $10^5 \div 10^7$ );

- высокая контрастная чувствительность (не менее 0,1);

- высокое быстродействие начальной стадии образования ИМОС ( $0,02 \div 0,1$  с);

- хорошее пространственное разрешение при малой интенсивности излучения.

Сочетание указанных требований при регистрации ИМОС требует включения в состав комплекса различной аппаратуры, дополняющей друг друга при проведении наблюдений. Для наблюдений ИМОС и измерений оптических характеристик были разработаны несколько типов оптических комплексов, в частности, стационарный базовый и мобильные выносные.

Одним из важных моментов оптических наблюдений ИМОС является система калибровки данных наблюдений, которая позволяет получать количественные данные по свечению ИМОС в различных диапазонах спектра на разных стадиях его эволюции. Конечная цель калибровки оптического комплекса - это получение спектрально-яркостных двумерных изображений ИМОС, приведенных в энергетических (поточковых) параметрах.

Для комплексной диагностики ИМОС обычно использовались также радиофизические методы и средства, которые специально разрабатывались для исследований ИМОС, а также штатные методы и средства, которые временно привлекались для измерений радиофизических параметров ИМОС, в т.ч.:

- автоматическая ионосферная станция вертикального зондирования и ионозонд "Базис-1";

- комплексы наклонного зондирования с различными расстояниями и углами между приемно-передающими средствами;

- комплексы возвратно-наклонного зондирования;

- многочастотные доплеровские комплексы вертикального и наклонного зондирования;

- метеорные радиолокаторы;

- радиолокационные станции КАМА ( $f = 1.7 \text{ ГГц}$ );

- приемно-передающие комплексы УКВ - диапазона (до 900 МГц);

- аппаратура для приема сигналов ракетных радиомаяков и определения полного содержания электронов на трассе радиозондирования

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА (ОКП), ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ (АЭ)

### 2.1. ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ДОЛГОЖИВУЩИХ ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ (ИПО)

Одним из интересных эффектов при проведении АЭ в ОКП является создание долгоживущих искусственных плазменных образований (ИПО) при инжекции химически активных плазмообразующих веществ и мощных ионных выбросов. Одним из "классических" случаев, такого рода ИПО, имеющих хорошую наблюдательную базу, являются выбросы плазмообразующих веществ в экспериментах по проекту "CRRES". Другим – ракетный эксперимент «Контраст», осуществленный с борта научно-исследовательского судна (НИС).

Искусственное бариевое облако создано 12.VIII.1991 г. в 09.31.21 UT с борта ИСЗ CRRES на высоте  $h = 507$  км в точке с координатами  $9,13^\circ$  с.ш.,  $63,5^\circ$  з.д. ( $L=1,21$ ). В ионосфере было инжесировано 6,6 кг смеси, содержащей пар бария.

Описанные ниже наблюдения осуществлялись на борту научно-исследовательского судна "Профессор Зубов" в точке с координатами  $11,5^\circ$  с.ш.,  $63,7^\circ$  з.д. на расстоянии 265 км от проекции точки инжекции на поверхность Земли.

Аппаратурный комплекс, с помощью которого были получены данные по искусственному облаку (ИО), включал:

- телевизионный комплекс с электронно-оптическим преобразователем для наблюдения слабосветящихся образований в верхней атмосфере [2,3];
- многочастотный комплекс вертикального доплеровского зондирования и ионосферную станцию вертикального зондирования [4].

Помимо того, начальная фаза образования ИО наблюдалась с борта самолета, который во время эксперимента находился над восточным побережьем о. Кубы ( $76^\circ$  з.д.) на расстоянии около 1800 км от точки образования ИО. Для наблюдения ИО на самолете использовались высокочувствительные телевизионные комплексы и фотоаппаратура.

Во время эксперимента проводилось радиофизическое зондирование ионосферы с использованием ионосферной станции и комплекса многочастотного вертикального доплеровского зондирования. По данным ионосферной станции заметных особенностей ионограмм, связанных с образованием ИО, не было обнаружено. В то же время с помощью 8 - ми частотного доплеровского комплекса зарегистрированы длительно существующие аномальные сигналы, обусловленные созданием ИО.

Доплеровское зондирование осуществлялось на восьми фиксированных частотах в диапазоне от 3,4 до 8,7 МГц. Критическая частота  $f_0F$  в 08, 11 и 14 ч UT соответственно составила 7,1, 6,7 и 11,2 МГц. На частотах  $f_7, f_8$  до инжекции отраженных сигналов от ионосферы не наблюдалось, т. к.  $f_7, f_8 > f_0F$ . Отраженные от регулярной ионосферы сигналы на частотах  $f_1, f_6$  имели время запаздывания в пределах  $1,7 \div 3,0$  мс. Спустя приблизительно 10 мин. после инжекции и до конца сеанса наблюдений (вплоть до 14 часов) были зафиксированы диффузно-отраженные сигналы на частотах  $f_7, f_8 > f_0F$  с большими временами запаздывания ( $3,6 \div 6$  мс), что, по-видимому, соответствует отражениям от ядра искусственной ионизированной области. Пример доплерограммы на частоте зондирования  $f_0 = 7,8$  МГц показан на рис. 1, где  $F$ -доплеровское смещение частоты. Здесь же приведены доплеровские спектры для характерных моментов времени после создания плазменного облака. Видно, что, во-первых, первая реакция на инжекцию на  $f_0$  наблюдается в 10.27 UT (т.е. спустя 56 минут после инжекции); во-вторых, имеет место слоистая структура спектра плазменных возмущений; в-третьих, спектры имеют шумовой характер, наибольшие размытия которых охватывают более 6 Гц ( $- 2 \div + 4$  Гц).

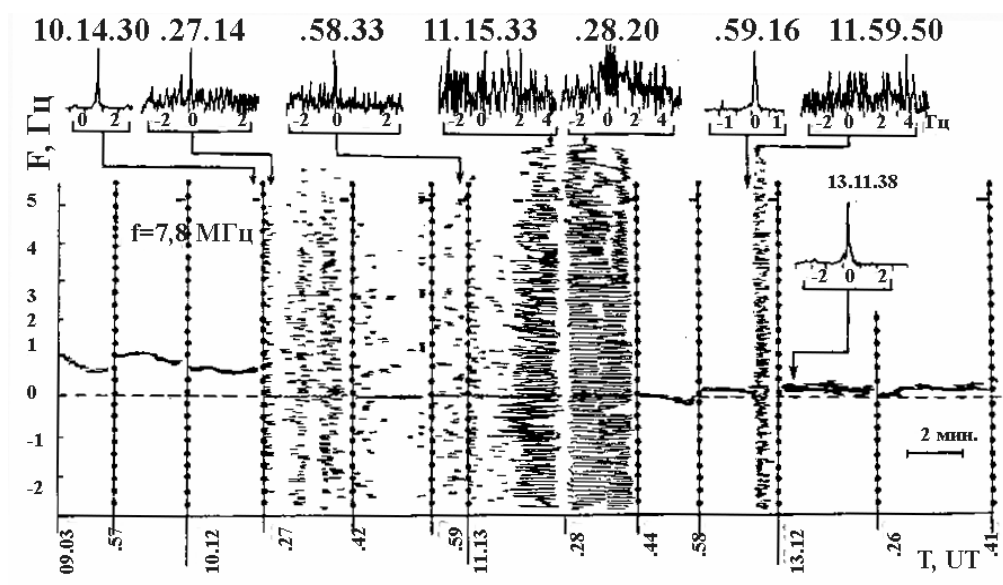


Рис. 1. Пример доплерограммы на частоте зондирования  $f_6=7,8$  МГц ( $f_6 < f_0F2$ ) и доплеровские спектры (верхняя часть рисунка).

Динамика доплерограмм на 4-х частотах ( $f_5 - f_8$ ) показана на рис. 2. Видно, что начало регистрации отраженных от ИИО сигналов на разных частотах смещается во времени. В частности, при  $f_i < f_0F$  по мере уменьшения высоты отражения (несущей частоты) время запаздывания сигналов от ИИО возрастает. Анализ данных доплеровских измерений с учетом геометрии эксперимента позволяет сделать следующие оценки:

- максимальная концентрация ИО превышает  $10^8 \text{ см}^{-3}$ ;
- скорость опускания модифицированной области ниже максимума слоя  $F$  составляет  $7 \div 9 \text{ м/с}$ .

Около 12.20. UT критическая частота  $f_0F > f_7, f_8$  и наступила полная экранировка модифицированной области ионосферы выше максимума над пунктом зондирования. С этого момента наряду с наклонными отражениями от ИО наблюдаются вертикальные отражения на частотах  $f_8, f_7$  от ионосферы с временами запаздывания  $2,5 \div 2,8 \text{ мс}$ . Общее время наблюдений доплеровских эффектов от модифицированной ионосферы составило более 250 минут с начала образования облака.

Таким образом, результаты доплеровских измерений показывают, что за время наблюдений происходило формирование плазменной неоднородности в ионосфере в  $F$ -области и постепенное ее опускание до высот  $250 \div 300 \text{ км}$ . Друга особенность доплеровских измерений - регистрация широкополосных доплеровских спектров – указывает на развитие неоднородной структуры ИО, которая может развиваться одновременно по всей толще возмущенной области.

На НИС "Профессор Зубов" ИО после инъекции оптическими методами наблюдалось всего около 1 мин, что было вызвано значительной яркостью неба во время проведения эксперимента (зенитный угол погружения Солнца составлял  $-5^\circ$ ). Регистрация ИО на Кубе осуществлялась в общей сложности около 10 минут. Результаты оптических наблюдений указывают на переход ионной струи, возникшей при инъекции, через вершину силовой линии геомагнитного поля и образование крупномасштабной неоднородности, вытянутой вдоль силовой линии.

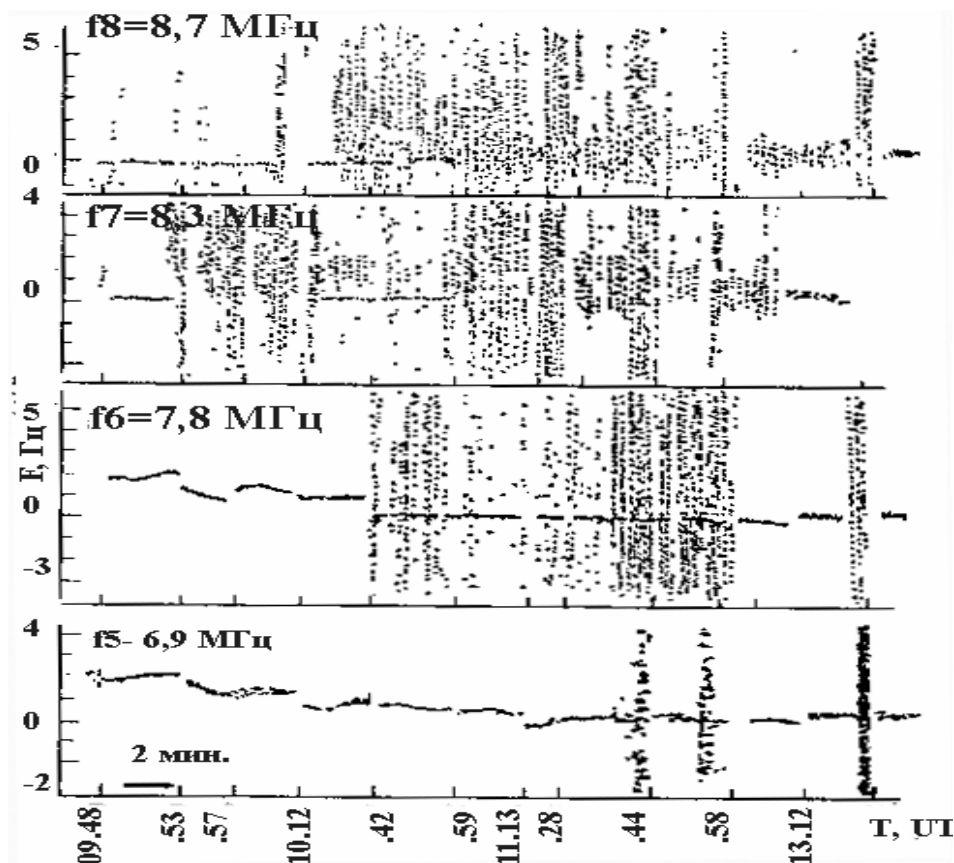


Рис. 2. Динамика доплерограмм на 4-х частотах ( $f_5 - f_8$ ).  
Пунктирные линии на спектрограммах указывают на размытие доплеровских спектров в измеряемом интервале доплеровских частот.

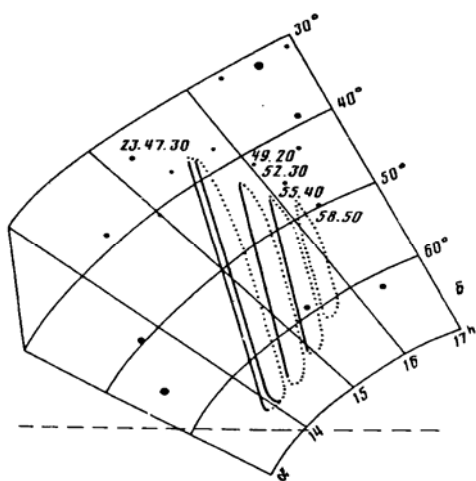


Рис. 3. Проекция положения наблюдаемого  
ИО на небесную сферу  
в период вечерних сумерек 12.08.1991 г.  
Цифрами указано всемирное время  
наблюдений.



Рис. 4. Изображение бариевого облака,  
зафиксированное через 14 часов  
после инъекции.

В тот же день 12.VIII.1991 г. в период вечерних сумерек при высоте тени 100 км с помощью телевизионной аппаратуры было зафиксировано светящееся образование,

вытянутое вдоль силовых линий геомагнитного поля. Облако регистрировалось в течение 22 минут вплоть до захода Солнца на высоте облака. Изменения наблюдаемых размеров облака, связанных с подъемом тени, и движение облака по небесной сфере во время наблюдений схематически показано на рис. 3.

По данным увеличения высоты нижнего края облака со временем (рис. 3) были определены точки пересечения луча зрения с плоскостью земной тени, и, следовательно, с силовой трубкой геомагнитного поля, на которой находилось облако. Такое рассмотрение позволило определить положение силовой линии и высоту нижнего и верхнего края облака. Рассчитанная высота для верхнего края облака составила около 330 км, для нижнего – 240 км, что соответствует высотам положения ИО, зарегистрированным доплеровской установкой. Координаты области силовой линии, на которой находилось облако  $15,8^\circ$  с.ш.,  $67,1^\circ$  з.д. ( $L = 1.2$ ). Дрейф облака во время наблюдений происходил на восток со средней скоростью 60 м/с, что соответствует электрическому полю, направленному перпендикулярно магнитному полю,  $E = 2,3$  мВ/м.

По данным оптических наблюдений [5] была проведена оценка яркости ИО, которая соответствовала концентрации ионов бария в центре облака, равная  $10^2$  см $^{-3}$ . Приближенная оценка полного количества ионов бария в наблюдаемом облаке дала значение  $10^{22}$  ионов.

На рис. 4 представлено изображение бариевого облака, зафиксированное через 14 часов после инъекции.

В эксперименте "Контраст" в августе 1991 г. с НИС была запущена ракета в вечерних сумерках с инъекцией 1 кг паров бария на высоте 224 км. Нейтральный барий быстро ионизовался, и через несколько минут ионное облако вытянулось вдоль магнитного поля и двигалось на восток. Вечером облако наблюдалось примерно 28 мин. К концу наблюдений размеры его составляли несколько десятков километров в высотном диапазоне 200 - 300 км. Скорость движения составляла около 50 м/с. Исключительный результат был получен в начале следующего дня, более, чем через 10 часов после инъекции. Облако было обнаружено визуально и потом регистрировалось более, чем в течение 40 мин. ТВ-устройствами до восхода Солнца.

На рис. 6 показано визуальное положение облака от НИС для различных моментов времени. Угловой размер облака был  $4 \times 12$ . Средняя напряженность электрического поля к геомагнитному востоку была 7 мВ/с, вдоль магнитного поля по направлению вниз около 1,5 мВ/м. Скорость дрейфа составляла около 200 м/с. На рис. 7 показаны проекции облака на меридиональную плоскость для различных моментов времени, иллюстрирующие его значительный вертикальный наклон. Для географической области, где проводился эксперимент, такое электрическое поле довольно высокое и должно сильно изменять структуру фоновой ионосферы и, в частности, проявиться в значительном увеличении высоты максимума  $F2$  слоя.

Таким образом, данные оптических наблюдений указывают на длительное (не менее 14 часов) существование ИО в низкоширотной ионосфере. Данные спутникового и ракетного экспериментов позволяют предположить, что в низкоширотной ионосфере имеются условия для поддержания выделенных плазменных неоднородностей, какими являются ИО. В случае создания крупномасштабных бариевых ионных облаков в эксперименте CRRES их длительное существование обусловлено малыми скоростями рекомбинации и фотохимических процессов с участием ионов бария, а также тем обстоятельством, что диффузионное расплывание вытянутых крупномасштабных ИО определяется преимущественно медленной поперечной диффузией ионов бария [6].

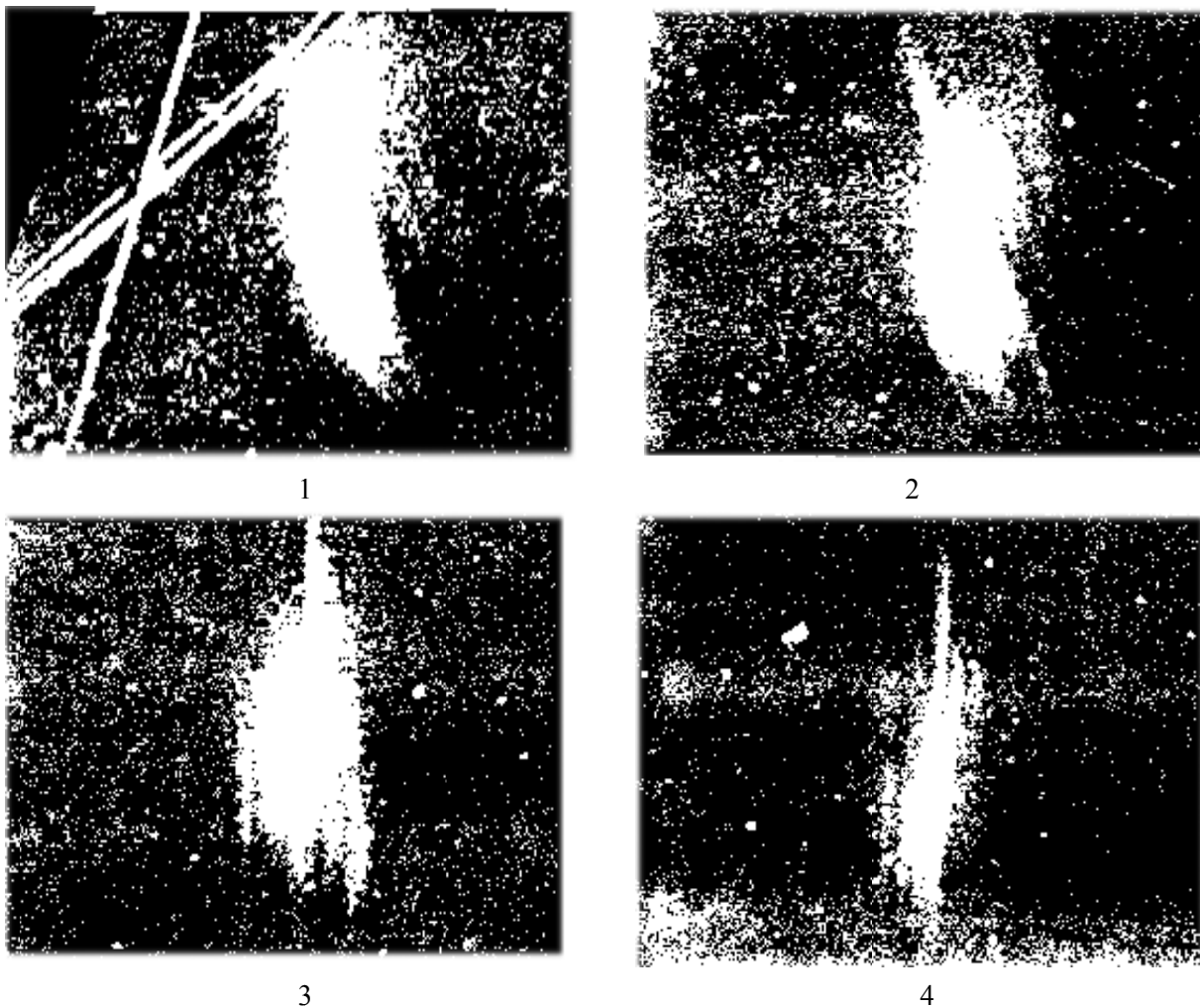


Рис. 5. Оптические изображения эволюции ИО 10 часов спустя после инъекции.  
Цифрами 1 - 4 обозначена последовательность кадров.

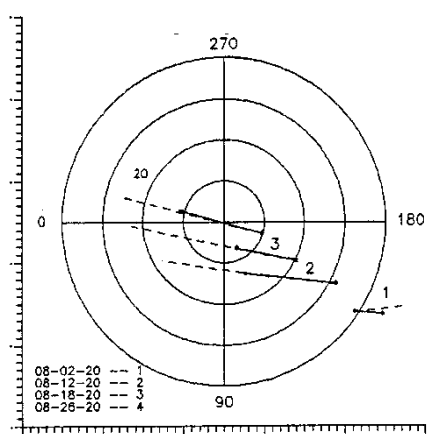


Рис. 6. Визуальное положение облака от НИС для различных моментов времени.

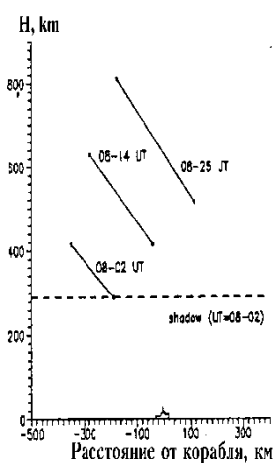


Рис. 7. Проекция облака на меридиональную плоскость для различных моментов времени, иллюстрирующие его значительный вертикальный наклон.

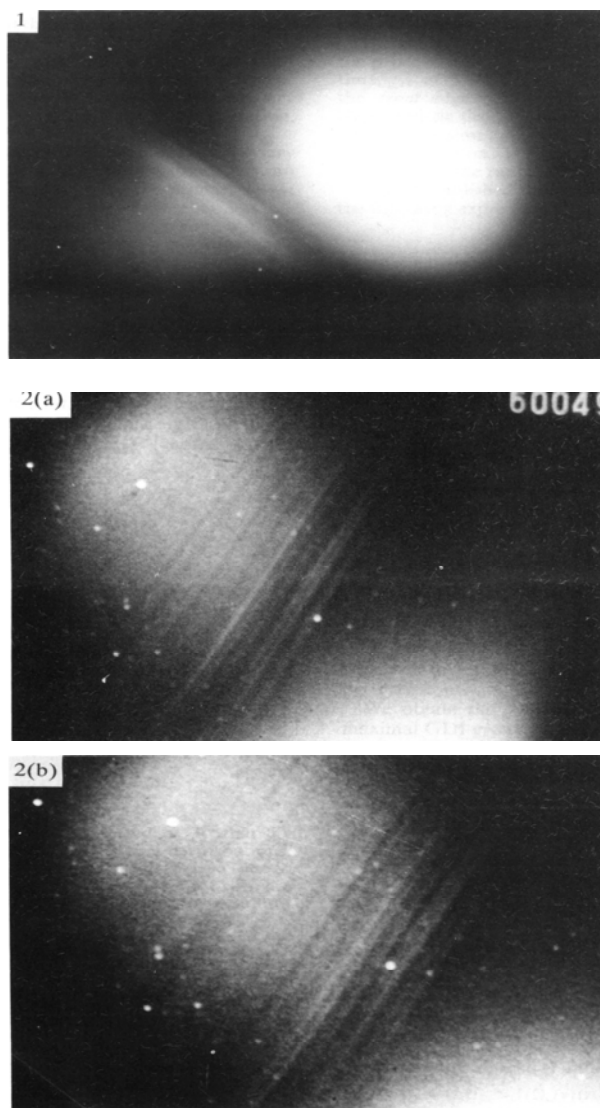


Рис. 8. Изображения стратифицированного ИПО для эксперимента, проведенного во время вечерних сумерек.

## 2.2. ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

В экспериментах по созданию ИПО в ионосфере методом инъекции плазмообразующих смесей, содержащих пары бария, часто наблюдается сложная картина развития неоднородностей, сопровождающаяся пространственным разделением нейтрального и ионизированного компонента и дальнейшей стратификацией последнего [7,3,8,9]. При этом механизмы эволюции нейтрального и ионизированного компонентов на различных стадиях развития неоднородностей изучены достаточно подробно [10,11], однако механизм стратификации ионизированного компонента еще окончательно не ясен во многом из-за недостаточности наблюдательных данных о процессах развития стратификации [9,12]. Приведем некоторые результаты наблюдений и их интерпретацию для серии наблюдений, выполненных с инъекцией паров бария в диапазоне высот 150 - 200 км, выполненных в 1988 - 1990 гг. Исследования проводились с помощью высокочувствительного оптического диагностического комплекса [3].

На рис. 8 показаны изображения стратифицированного ИПО для эксперимента, проведенного во время вечерних сумерек. На рис. 8(1) видно квазисферическое

нейтральное облако и начальная стратификация ионного облака. На рис. 8(2(a)) и 8(2(б)) представлено развитие стратификации ионного облака во времени. Размер области, занимаемый стратами на первом рис. 5,5 км, а на втором - 17,5 км. Время наблюдения стратификации составило 25 мин.

По наблюдениям в экспериментах можно выделить характерные особенности тонкой структуры стратификации ионного компонента ИСО. Стратификация происходит на переднем крае ионного сгустка с отходом страт в направлении дрейфа сгустка в скрещенных ЕхВ полях.

Ориентация отдельных плазменных волокон с точностью  $1^\circ$  совпадает с направлением силовых линий геомагнитного поля, характерные размеры страт тонкой структуры: диаметр 100 - 200 м, длина 20 - 25 км (параметр вытянутости  $a = L/d > 200$ ). Оценка концентрации ионов в отдельных стратах по фотометрическим измерениям дает величины от  $5 \cdot 10^5$  до  $10^6$  см $^{-3}$ .

Скорости движения отдельных страт существенно различаются в зависимости от яркости и расположения в стратифицированной ионной структуре. Так, крайняя страта движется со скоростью 100 м/с, в то время как внутри структуры скорости страт составляют 80 - 95 м/с в системе координат, связанной с поверхностью Земли. Образование новых страт происходит с характерным временем 3 - 4 с, причем вновь возникшие страты не появляются между уже существующими, а возникают в промежутке между ионным сгустком и сформировавшейся тонкой стратифицированной структурой. Внутри стратифицированной структуры происходит разделение уже существующих страт с тем же характерным временем, при этом первичная, страта приобретает диффузный вид ( $d \perp \approx 300$  м) и на ее передней границе образуется вторичная страта.

Характерный размер вторичных страт 100 - 150 м. Вновь образовавшаяся вторичная страта движется в том же направлении, что и структура в целом. При разделении первичной страты вторичная страта имеет не только меньший диаметр, но и меньшую яркость, однако в одном случае регистрировалось увеличение яркости вторичной страты через 10 с после ее отделения. Время жизни отдельных страт тонкой структуры составляет около 30 с, граничные страты в структуре диффузно расплываются раньше внутренних.

В эксперименте тонкая стратифицированная структура ионной составляющей ИСО сохраняется по материалам наблюдений в течение 5 мин, после чего система страт приобретает вид нескольких параллельных друг другу диффузных ионных сгустков. Их характерные поперечные размеры 2,5 - 4 км, расстояние между ними 1,5 - 2 км. Такие диффузные сгустки образуются совокупностью 3 - 6 страт, расположенных близко друг к другу, при этом яркость фона между отдельными диффузными стратами внутри сгустка выше, чем между сгустками. Структура йодной составляющей в виде системы ионных сгустков существует в течении 16 мин, в дальнейшем происходит ее диффузное расплывание. По результатам триангуляционных измерений движения ионного сгустка и отдельных страт в эксперименте можно оценить величину напряженности фонового электрического поля  $E$ . Плотный ионный сгусток и отдельные страты вследствие различия концентрации ионов бария в них приводят к различным степеням возмущения фонового электрического поля, и поэтому их движение в скрещенных ЕхВ полях происходит с различными скоростями.

По движению крайней страты и с учетом влияния нейтрального ветра (скорость  $u$ , измеряется по движению нейтрального облака) определена величина напряженности внешнего электрического поля по формуле:

$$E_{\perp} = \frac{\lambda^* + 1}{2} \cdot \left[ \frac{\bar{B}}{B} \cdot v_{H\perp} + \frac{1}{k} (v_{H\perp} - v_{H\parallel}) \right] + \frac{\lambda^* - 1}{\lambda^* + 1} \cdot \left( v_{H\perp} \cdot \frac{\bar{B}}{B} \right) \quad (1)$$

где:  $v_H$  - скорость страты,  $\lambda^*$  - отношение ионосферной и проинтегрированной по облаку педерсеновских проводимостей, равное для условий эксперимента 1, 2,  $k$  -



отношение гирочастоты ионов бария к частоте соударения с нейтрами. Значение  $E \perp$  оказывается равным 4,8 мВ/м.

Следует отметить, что концентрация ионов в основном сгустке значительно превышает концентрацию ионов в отдельных стратах (по оценкам  $> 10^7 \text{ см}^{-3}$  в сгустке и  $< 10^6 \text{ см}^{-3}$  в стратах), вследствие чего величина напряженности фонового электрического поля по движению ионного сгустка оказывается равной  $E = 2,2 \text{ мВ/м}$ . Сравнив эти две величины, можно оценить степень возмущенности электрического поля, вносимой ионным сгустком в  $E$ , которая оказывается равной 45 % в предположении справедливости (1).

В целом развитие ионного компонента в экспериментах до начала стратификации хорошо согласуется с картиной дрейфового расплывания плазменной неоднородности и описывается физическими моделями, разработанными в [10-14]. Эволюцию ионных облаков в экспериментах можно интерпретировать как случай промежуточной нелинейности, на что указывают и оценки концентрации ионов бария в неоднородностях (в ионном сгустке в момент разделения ионного и нейтрального облаков и в отдельных стратах). Концентрация ионов значительно превышает фоновую ( $n = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  [15]), но не настолько, чтобы внешнее электрическое поле  $E$  внутри ионного облака было полностью скомпенсировано возмущенным электрическим полем - для этого необходимо более значительное превышение плотности инжектированной плазмы над фоновой [16]. Инжектированные ионы двигались в скрещенных  $E \times B$  полях, скорость и направление движения облака ионов не совпадали со скоростью и направлением движения нейтрального облака.

При наблюдениях стратификации ИО в проведенных ракетных экспериментах был зарегистрирован ряд важных, ранее не рассматривавшихся особенностей:

- Существование хорошо выраженной высотной границы возникновения стратификации, которая соответствует  $h = 150 - 160 \text{ км}$ . Данный эффект иллюстрируется рис. 9, на котором приведены фотографии пяти ИО, созданных в диапазоне высот от  $h = 154 \text{ км}$  (5-ое облако) до  $185 \text{ км}$  (3-е облако). В 1 - 4 облаках (справа-налево), расположенных на  $h = 165 - 185 \text{ км}$ , стратификация развивается по одной схеме: на западной границе ИО формируется цепочка страт, постоянно дрейфующих на запад, в 5-м облаке на  $h < 160 \text{ км}$  стратификация не развивается совсем.

- По данным радиофизических измерений резкий ("катастрофический") характер развития неоднородностей происходит за  $t < 30 \text{ с}$  и наблюдается в широком диапазоне частот зондирующего излучения [17].

- За время жизни ИО происходит возникновение супертонкой структуры - мелкомасштабных неоднородностей с малым временем жизни ( $t < 10 - 60 \text{ с}$ ) с поперечными размерами от  $100 - 150 \text{ м}$ , разрешаемыми оптическими методами [18], до  $10 - 30 \text{ м}$ , измеряемыми радиофизическими средствами.

- В условиях спутниковых экспериментов на  $h = 400 - 500 \text{ км}$  тонкая структура развивается в меньшей степени и возникает только в наиболее плотной части ИО вблизи области инжекции. В отдельных случаях в разреженной части ИО впервые наблюдались крупномасштабные волновые структуры с  $L = 10 - 30 \text{ км}$  и временем жизни не менее  $t = 20 - 30 \text{ минут}$ , связанные, по-видимому, с распространением перемещающихся ионосферных возмущений [2,20].

Ряд обнаруженных в ракетных экспериментах особенностей в развитии тонкой структуры ИО (высотная зависимость явления стратификации, быстрые вариации неоднородностей) могут быть объяснены различного типа неустойчивостями в ИО.

Искусственная модификация ионосферы при инжекции плазмы и плазмообразующих составов сопровождается различными нелокальными процессами различного характера и масштаба. К числу основных из них, которые были исследованы в проведенных экспериментах, относятся следующие:

- генерация волновых явлений в верхней атмосфере и перемещающихся возмущений в ионосфере [20,21,22];
- возбуждение МГД - волн и эффектов, связанных с их распространением[23,24];
- совокупность явлений, связанных с дистанционным воздействием электромагнитных излучений, которые возбуждаются при локальных воздействиях, на высыпание захваченных частиц из радиационных поясов Земли [25-27];
- генерация интенсивных высокоскоростных плазменных потоков вдоль силовых линий геомагнитного поля и образование крупномасштабных ионосферно-плазмосферных неоднородностей [2,19];
- процессы, приводящие к стимулированному возрастанию и генерации пульсаций потоков геоэффективных и энергичных электронов в авроральной ионосфере (авроральный "триггер") [23,24];
- процессы, вызывающие стимулированное развитие неустойчивости Релея-Тейлора в экваториальной ионосфере ("экваториальный триггер") [20,28-32].

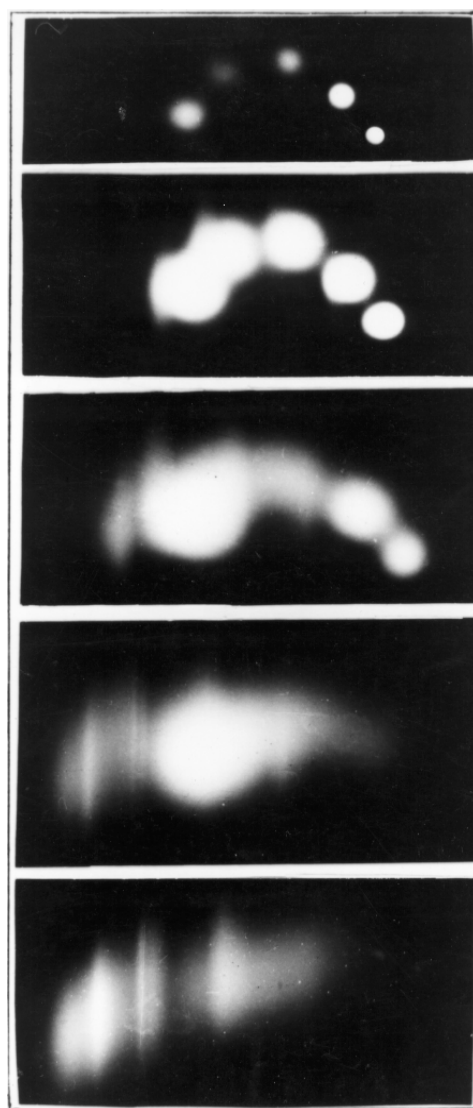


Рис. 9. Изображения пяти ИО, созданных в диапазоне высот от  $h=154$  км (5 - ое облако) до – 185 км (3 - е облако).

### 2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННО МОДИФИЦИРОВАННОЙ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Один из возможных механизмов развития высыпания авроральных электронов в начальной фазе суббури - генерация Альвеновских волн (АЛВ), заканчивающаяся развитием около вершины ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) интенсивной плазменной турбулентности и продольных электрических полей, сопровождаемых ускорением электронов, модулируемых собственной частотой ИАР [33]. Поскольку для проверки этого механизма развития явления суббури в авроральной ионосфере может использоваться искусственная генерация АЛВ, ряд активных ракетных экспериментов с выпусками плазмообразующих веществ, приводящих к генерации АЛВ, и возбуждению ИАР было выполнено в рамках программы "Авроральный триггер" (табл. 1) [23,34]. Результаты экспериментов также прояснили некоторые основные особенности триггерных явлений и процессов в искусственно измененной авроральной ионосфере после химического выпуска [35].

Таблица. 1

Данные по экспериментам программы «Авроральный триггер»

Эксперимент	Дата	Время запуска, UT	Координаты		$h_{\text{выпуска}}$	Выпуски	
			Ф, N	λ, W		Масса, кг	компонента
АТ-1	11.03.82	19.35	68°14'	0°02'	156	9	Cs
АТ-2	27.08.83	21.00	68°05'	0°17'	160	9	Cs
АТ-3	16.09.90	20.00	67°54'	0°10'	191	14	Ba

Эксперименты были выполнены на исследовательских кораблях, оборудованных ракетными пусковыми установками. Во время экспериментов корабли были помещены в Норвежском море в авроральной области ( $L = 6.0 - 6.2$ ). Пиротехнические цезиевые и бариевые генераторы были выброшены из ракет МР - 12 и МР - 20 и взорвались на расстоянии 300 – 400 м. перед ракетой и на высотах 155 - 190 км. Скорость расширения газо-плазменного облака была 1.0 - 1.2 км/с. Точки выпуска и ракетные полезные грузы были расположены в той же самой магнитной трубке во всех экспериментах. Ракеты были запущены в оптимальных геофизических условиях, которые были определены на основе модельных оценок и предварительных наблюдений ионосферы в экспериментальных пунктах [24]. Эти условия включали:

- 1) расположение точки запуска по направлению к полюсу плазмопаузы;
- 2) слабо или умеренно возбужденное геомагнитное поле и ионосфера;
- 3) запуски ракет в N - W направлении, соответствующем конвекции плазмы и направлению перемещения АЛВ во время эксперимента (19.00 - 21.00 UT).

Диагностика явлений, вызванных выпусками плазмообразующих веществ, была выполнена с использованием приборов на борту ракеты и корабельных оптических и радиофизических приборов. Комплекс ракетной бортовой измерительной аппаратуры включал: ионный и нейтральный масс - спектрометры (два поддиапазона 10 - 47 и 30 – 160 а. е.); спектрозонд измерявший: а) квазипостоянное электрическое поле (0 – 20 Гц) и б) переменную составляющую электрического поля в 10 частотных измерительных каналах, от 35 Гц до 18 кГц; спектрометр электронов, имевший два мониторинговых канала на энергиях 1 кэВ и 5 кэВ; счетчик Гейгера, измерявший интегральный поток заряженных частиц с энергиями >40 кэВ; датчик магнитного поля с двумя компонентами (параллельно

оси ракеты и перпендикулярно ей). Ракетные приборы обеспечили измерения плотности и состава нейтральных и ионизированных компонентов, непосредственно электрического поля, очень низкочастотных (ОНЧ)  $E$  –полей, потоки мягких ( $E = 0.1 - 5.0$  кэВ) и энергичных ( $E > 40$  кэВ) электронов.

С борта судна велись наблюдения с помощью ионосферной станции вертикального зондирования (АИС) и оптических средств. Ионосферный зонд корабля дал доказательства слабых и умеренных возмущений в ионосфере перед ракетными запусками. Значения направленного вдоль поля тока в ионосфере и конвекции  $E$  – поля, определенные с использованием экспериментальных данных, были около порога этих параметров, соответствующих развитию суббуревых явлений [33]. Таким образом, условия в нестабильной ионосфере были подходящие для триггерных эффектов, которые могли бы стимулироваться в экспериментах [23].

Газодинамические и аэрономические процессы в ионосфере, сопутствующие выпускам, представлены в [36]. В этом разделе рассмотрим явления, относящиеся только к изменениям прямых электрических полей, флуктуаций ОНЧ  $E$  –полей и потоков электронов.

В каждом эксперименте АТ - 1 - АТ - 3 наблюдались коррелированные возмущения прямых электрических полей, ОНЧ  $E$  – полей и потоков электронов. Некоторые эффекты, найденные в эксперименте АТ - 3, рассмотрены прежде в статьях [23] и [37]. Данные, рассмотренные ниже, проясняют характер ионосферных возмущений, вызванных инъекцией плазмформирующих веществ.

Изменения поперечного прямого электрического поля после выпуска цезиевой смеси в ионосфере, наблюдаемые в эксперименте АТ - 1 показаны на рис. 10.

Впереди облака видно увеличение амплитуды электрического (4 - 5 раз), коррелированное с максимумом плотности плазмы. В облаке  $E$  – поле увеличивается до 1.5 – 2 раз по сравнению с фоном. Увеличение сопровождалось маленьким уменьшением  $E$  – поля на обратном краю облака. Особенности вариаций  $E$  –поля в эксперименте АТ – 1, подобны найденным в эксперименте АТ - 3 [37]. Параметры импульса  $E$  –поля были достаточны для генерации АЛВ, которая может возбудить ИАР с генерацией турбулентного пограничного слоя и ускорения электронов в этом слое. Инъекция плазмформирующих веществ в экспериментах сопровождалась развитием интенсивных низкочастотных флуктуаций  $E$  – полей. Данные измерений  $E$  – полей на  $F = 0.42, 1.6$  и  $10.2$  кГц полученные в эксперименте АТ - 1, представлены на рис. 11. Изменения амплитудных флуктуаций  $E$  – поля, так же как модуляции из-за вращения ракеты, наблюдались после выпуска. Существенные флуктуации  $E$  – поля на  $F = 0.42$  кГц были ограничены главным образом в пределах облака, в то время как возмущения  $E$  – полей на  $F = 1.6$  и  $10$  кГц были зарегистрированы также вне облака.

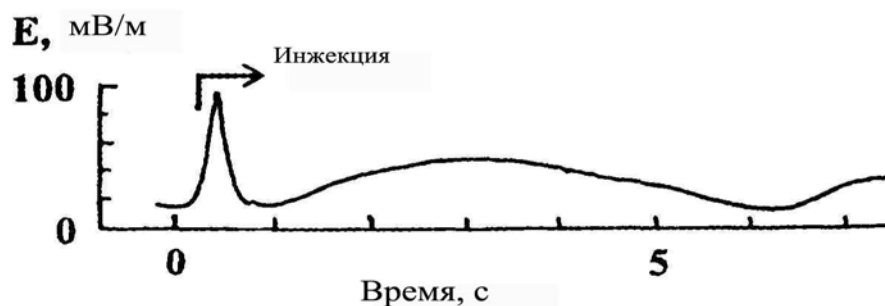


Рис. 10 Вариации  $E$ -поля после инъекции в эксперименте АТ-1.

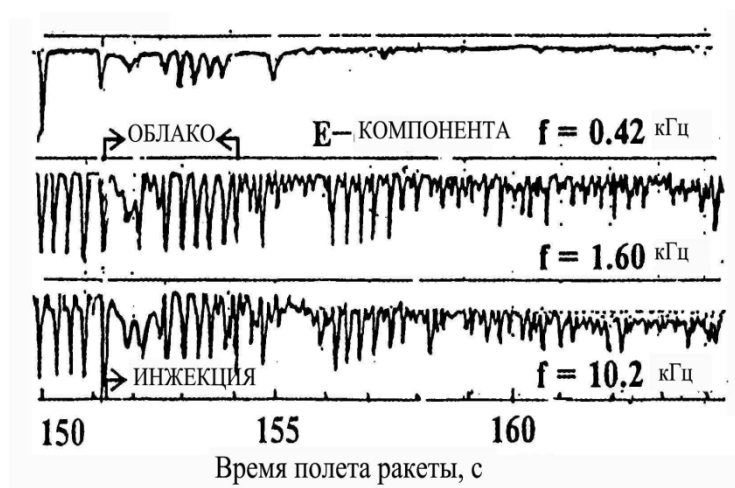


Рис. 11. Запись ОНЧ сигналов после инъекции облака в эксперименте АТ – 1.

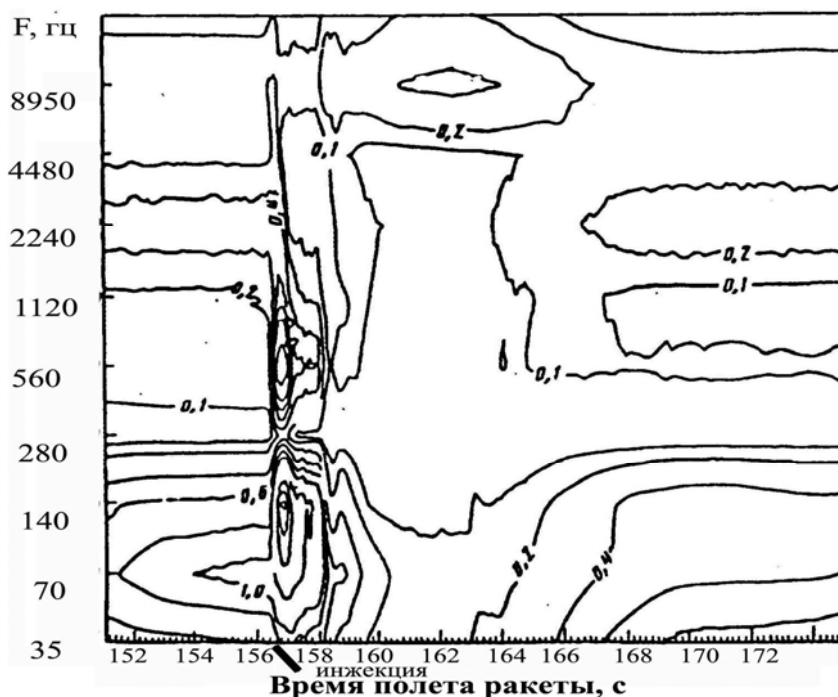


Рис. 12. Флуктуации низкочастотных E-полей, вызванные созданием облака (эксперимент АТ-3).

Характер изменений низкочастотных электрических полей, сопровождающих создание облака в эксперименте АТ - 3, представлен на рис. 12. Границы рис. 12 соответствуют фоновым условиям. Найдены существенные изменения полей на частотах  $F = 140$  и  $560$  Гц впереди облака и внутри него. Важно, что как в эксперименте АТ - 1 в эксперименте АТ - 3 наблюдались изменения низкочастотных полей в ионосфере для  $10$  с ( $\sim 2.5$  км) после выхода ракеты из облака. Появление сильных волновых  $E$  – полей после выпусков вызвано интенсивной плазменной турбулентностью, сопровождаемой генерацией поперечного  $E$  – поля, направленного вдоль поля тока и ускоренных электронных потоков [23].

Во всех экспериментах наблюдались следующие особенности стимулируемых возмущений электронных потоков ( $E = 1 - 5$  кэВ) (рис. 13,14):

- возникновение импульсов электронных потоков за 0.1 - 0.5 с, коррелирующих с плазменным сгустком и пульсацией электрических полей впереди облака;
- увеличение в 10 – 20 раз в потоке электронов после выпуска не только в облаке, но и вне облака в ионосфере;
- пульсирующий характер электронных потоков.

Существенные пульсации электронов с  $E = 1$  кэВ в эксперименте АТ - 1 видны на рис. 13.

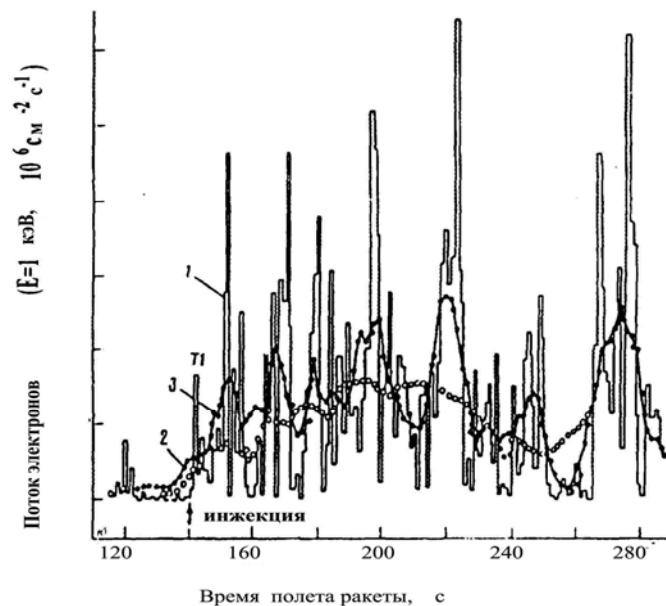


Рис. 13. Изменения потоков 1 кэВ электронов в эксперименте АТ – 1.

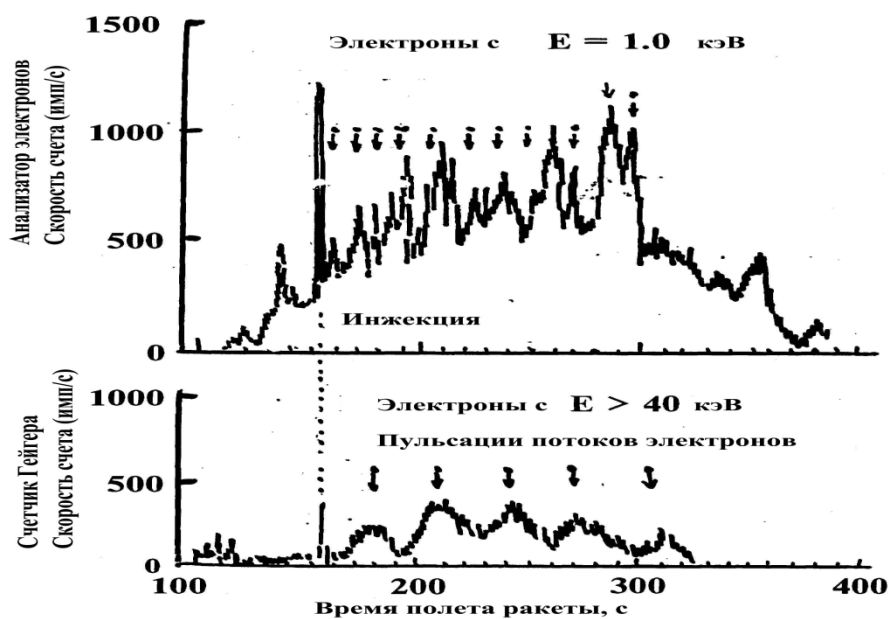


Рис. 14. Стимулированные пульсации потоков электронов в эксперименте АТ – 3.

Спектральный анализ электронных потоков с  $E = 1$  кэВ после выпуска облака в эксперименте АТ - 1 выявил пики спектральной плотности, соответствующие частотам 0.03 - 0.05, 0.13 и 0.3 Гц.

Генерация пульсаций потока после выпуска облака в эксперимента АТ - 3 проиллюстрирована на рис. 14, где представлены данные по электронным потокам с  $E = 1$  кэВ и  $E > 40$  кэВ. В эксперименте АТ - 3 пульсации потока мягких электронов соответствуют частотам 0.03, 0.15 и 0.3 Гц. Частота пульсаций потока энергичных электронов в эксперименте АТ - 3 была приблизительно 0.03 Гц.

Явления коррелированных возмущений плазмы, электрических полей и потоков электронов, наблюдаемых в экспериментах после выпусков могут быть объяснены искусственной генерацией альвеновского импульса в модифицируемой ионосфере, который возбуждает ИАР, сопровождаемый ускорением и высыпанием авроральных электронов. Оценки возбуждения ИАР, вызванного выпуском облака продемонстрировали, что диапазон возможных значений собственных частот ИАР для условий экспериментов мог бы быть  $f = 0.6 - 2.2$  Гц. Эти значения, в пределах точности оценок, соответствуют значениям наблюдаемых частот пульсации потоков высыпавшихся электронов с  $E = 1 - 3$  кэВ, то есть электронов, ускоренных в ИАР и проявляющих генерацию АЛВ в ИАР [37]. Существование существенных пульсаций потоков мягких и энергичных электронов с  $f = 0.01 - 0.03$  Гц, зарегистрированное в экспериментах может быть доказательством проникновения АЛВ в магнитосферу, сопровождаемое взаимодействием АЛВ с частицами и электронным высыпанием, модулируемым АЛВ в ионосфере. Высыпавшиеся электроны обеспечивают рост проводимости ионосферы, что дает в результате появление дополнительного источника АЛВ, который увеличивает потоки высыпавшихся электронов и поддерживает триггерные процессы, стимулируемые выпуском. Нужно подчеркнуть, что в эксперименте "Trigger" [35] с взрывным выпуском цезия пульсация мягких электронов не наблюдалась, но высыпание энергичных электронов ( $E = 10$  кэВ) было зарегистрировано. Это можно объяснить условиями эксперимента "Trigger": более высокой частотой генерированной АЛВ не захваченной ИАР, так же как устойчивой ионосферой при  $L = 5.4$ . Следовательно, изменяя экспериментальные условия, можно стимулировать высыпавшиеся электроны с различными энергиями.

Анализ экспериментальных результатов показал, что выпуски в авроральной ионосфере сгенерировали пульсирующий поток мягких электронов. Это вызвано как состоянием ионосферы, так и экспериментальными условиями, приводящими в результате к интенсивной генерации АЛВ. Параметры этой волны, по оценкам, были достаточными, чтобы рассеять существенную фракцию волновой энергии на верхней границе ИАР и сформировать турбулентный пограничный слой. Продольное электрическое поле этого слоя ускоряло электроны, по крайней мере, до  $E \sim 1$  кэВ. Соответствие основной частоты электронной пульсации 1 кэВ и собственной частоты ИАР - экспериментальное обоснование механизма, предложенного в [33] для развития электронного высыпания во время суббури. Сравнение условий этого эксперимента с условиями эксперимента "Trigger" [35] показало, что, изменяя экспериментальные условия, можно выборочно стимулировать высыпание мягких электронов с  $E \sim 1$  кэВ или энергичных электронов с  $E \sim 10$  кэВ. Электронное высыпание так же как длительная продолжительность возмущений ОНЧ  $E$  - полей также проясняет характер триггерного эффекта в искусственно измененной химическими выпусками авроральной ионосфере в активных экспериментах [35] и во время запусков больших ракет.



## 2.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННО МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Отличительной особенностью экваториальной ионосферы, помимо хорошо известной аномалии в широтном распределении электронной плотности  $N_e$  [38], является существование вытянутых вдоль магнитного поля крупномасштабных неоднородностей с пониженной  $N_e$ , получивших название «пузырей» ионизации [39-42]. Этот тип неоднородностей возникает в послезаходные часы на высотах ниже и вблизи максимума  $F2$  —слоя и затем в течение ночи охватывает значительную область ионосферы вплоть до высот – 1000 км. Характерно, что образование «пузырей», поперечные размеры которых достигают от сотен метров до десятков километров, а продольные - сотен километров, сопровождается каскадной генерацией мелкомасштабных неоднородностей с размерами, по крайней мере, до единиц метров и десятков сантиметров [43,44]. Возникновение неоднородностей различных масштабов проявляется в известном эффекте  $F$  – рассеяния [44].

Для объяснения образования «пузырей» ионизации обычно используются теоретические представления о развитии неустойчивости Релея-Тейлора (НРТ) в послезаходные часы в основании экваториального  $F$  —слоя, характеризующегося резким градиентом  $N_e$ , при восходящем дрейфе  $F$  —слоя. Триггерный характер запуска НРТ проявляется в малой величине засеивающих возмущений, составляющих несколько процентов от фоновых значений  $N_e$ , которые приводят, в конечном счете, к образованию крупномасштабных неоднородностей с уменьшением  $N_e$  до трех порядков величины [45-47].

В [48-52] представлены теоретические оценки развития «пузырей» ионизации при искусственной модификации ионосферы в результате инъекции плазмогасящих компонент в основании  $F$  —слоя, возмущения проводимости  $E$  —слоя и генерации волновых возмущений. Реализация этих представлений в активных экспериментах позволяет проверить теоретические представления об НРТ и образовании «пузырей» ионизации, а также оценить возможности искусственного запуска крупномасштабных неоднородностей в экваториальной ионосфере при антропогенных воздействиях, вызванных инъекцией вещества и работой мощных излучающих средств в радиодиапазоне [53,54].

В связи с этим в рамках программы «Экваториальный триггер» (ЭТ) выполнен цикл исследований, предусматривающих проведение экспериментов активного типа для проверки механизмов стимулированного «запуска» НРТ и неоднородностей в экваториальной ионосфере [48-52]. Ниже рассмотрены некоторые результаты экспериментов по волновому механизму запуска НРТ и  $F$  —рассеяния [52,55].

Было проведено четыре эксперимента ЭТ - 1,..., 4, данные по которым сведены в табл. 2. Они осуществлялись в рейсах научно-исследовательского судна «Профессор Zubov», оснащенного комплексом для запусков ракет МР - 12 и МР - 20, вблизи геомагнитного экватора ( $\pm 2^\circ$  магнитного наклона) в послезаходные часы. Для генерации волновых возмущений в термосфере проводилась импульсная инъекция слабоионизированного Cs или Ва-содержащего состава. Бортовые генераторы, использованные в экспериментах, описаны в [38,24].

Для исследований явлений в ионосфере, сопровождающих инъекцию вещества, в экспериментах ЭТ - 3, 4, помимо ионосферной станции использовался многочастотный комплекс вертикального доплеровского зондирования [4]. Схема и методика радиозондирования ионосферы [4], использованная в экспериментах, обеспечивала диагностику ионизированного облака, образующегося в результате инъекции, а также модифицированной ионосферы на различных высотах после создания облака. Зондирование на разных частотах давало возможность отслеживать динамику и особенности волнового возмущения при его распространении в ионосфере.

Данные по экспериментам по программе «Экваториальный триггер»

Обоз- начение	Дата проведен ия	Время проведения		Координаты		Высота создания облака, км	Количество вещества, кг	Диагностика
		UT	LT	Широта с. ш.	Долгота з. д.			
ЭТ-1	19.X 90	19.03	17.03	2°03'7"	24°04'8"	210	37	Оптика,
ЭТ-2	22.X 90	18.13	16.13	1°42'3"	24°10'3"	180 - 220	30	Ионозонд
ЭТ-3	04.IX 91	20.13	18.13	8°14'48"	24°33'	213	50	Оптика, ионозонд, допл. комплекс
ЭТ-4	08.IX 91	20.24.29	18,24.29	8°13'	24°59'59"	209	50	

Одновременные оптические наблюдения динамики облака позволяли определять направление и скорость зонального дрейфа в ионосфере, влияющего на эффективность развития «пузырей»  $N_e$ .

Существенным моментом при проведении экспериментов являлось определение момента инъекции, чтобы обеспечить стимулированный запуск НРТ в условиях послезаходного восходящего дрейфа  $-F$  – слоя до появления естественного  $F$  – рассеяния. С этой целью до экспериментов осуществлялись наблюдения за состоянием ионосферы, включая динамику развития естественного  $F$  – рассеяния в послезаходные часы. Результаты наблюдений дрейфа  $F$  – слоя, указывают, что естественное  $F$  – рассеяние наблюдается через 1,0 - 2,5 часа после начала подъема  $F$  – слоя.

На основе проведенных наблюдений были определены необходимые моменты инъекции. Выбранные моменты обеспечивали, с одной стороны, условия, необходимые для развития НРТ - формирования области резких градиентов  $N_e$  ниже максимума  $F$  – слоя и восходящий дрейф ионизации, а с другой стороны - достаточный интервал времени (до начала естественного  $F$  – рассеяния) для развития «искусственного»  $F$  – рассеяния.

Для иллюстрации на рис. 15 (а, б) приведены ионограммы, зарегистрированные в фоновых условиях и после инъекции в эксперименте ЭТ - 2. Из рисунка видно, что через 10 мин после инъекции на ионограмме регистрируется трек, соответствующий облаку, а также наблюдается заметное  $F$  – рассеяние. Спустя ~ 30 мин после отмеченного эффекта началось развитие интенсивного  $F$  – рассеяния естественного происхождения.

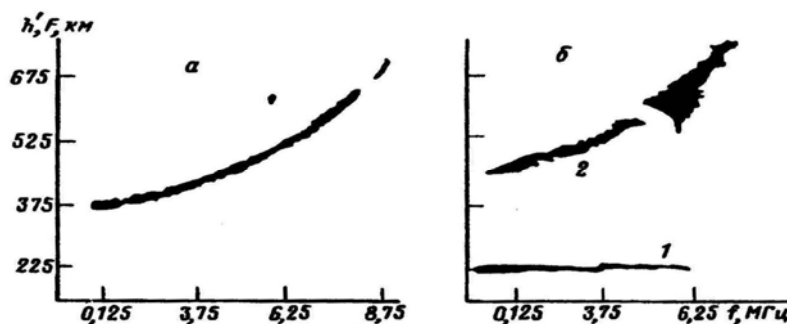


Рис. 15. Ионограммы, полученные в эксперименте ЭТ - 2. а – до инъекции;  
б – через 10 мин. после создания облака;  
1 – отражение от облака; 2 – диффузное отражение от ионосферы.

Для характеристики особенностей распространения в ионосфере волнового возмущения, генерируемого инжекцией плазмообразующего вещества, а также развития неоднородной структуры ионосферы на рис. 16 приведены доплерограммы, зарегистрированные при зондировании ионосферы на различных частотах в эксперименте ЭТ - 4, ( $F$  — доплеровское смещение частоты). В качестве иллюстрации особенностей регистрируемых доплеровских эффектов на рис. 17 приведена отдельная доплерограмма и соответствующие доплеровские спектры на частоте 6,4 МГц.

Рис. 16. Ионосферные доплерограммы на различных частотах, полученные в эксперименте ЭТ – 4.

Рис. 17. Ионосферная доплерограмма на частоте 6,4 МГц и соответствующие ей доплеровские спектры.

1. После инъекции возникают два различных типа возмущений в ионосфере, регистрируемых доплеровским методом: первый тип проявляется на различных высотах с временным сдвигом, увеличивающимся по мере роста частоты зондирования, то есть высоты области отражения; второй тип (рассматривается в [24]) отмечается непосредственно после инъекции и наблюдается только вблизи максимума  $F$  – слоя ( $f = 10,7$  МГц);

2. Первый тип возмущения характеризуется волнообразным изменением  $F$  на фоне общего изменения, связанного с регулярным дрейфовым перемещением ионизации. Величина  $\Delta F$  для максимума доплеровского спектра достигает  $\pm 0,2$  Гц.

3. Волнообразные возмущения  $F$  на  $f = 6,4$  МГц сопровождаются уширением и размытием доплеровского спектра до  $\pm 0,5$  Гц от центральной частоты (рис. 17), которое может быть проявлением локального  $F$  – рассеяния. Важно подчеркнуть, что этот эффект существенно уменьшается или не регистрируется после окончания волнообразного возмущения.

4. Размытые доплерограммы после прохождения волнообразного возмущения регистрируются на  $f = 10,9$  МГц (рис. 16), то есть вблизи максимума  $F$  – слоя ( $f_{кр} = 11,7$  МГц). Следует подчеркнуть, что это явление возникает непосредственно после возмущения и усиливается со временем. Размах  $F$  составляет при этом  $\pm 1,5$  Гц.

5. Эффект естественного  $F$  – рассеяния регистрируется более, чем через час после прохождения искусственного волнообразного возмущения в ионосфере и захватывает всю толщу ионосферы (рис. 16).

Совокупность приведенных данных позволяет сделать вывод, что инжекция в эксперименте плазмообразующего состава на  $h \sim 200$  км (см. таблицу) сопровождается генерацией волнообразного возмущения, которое распространяется до высоты максимума  $F$  – слоя ( $h \sim 430$  км) и вызывает образование плазменных неоднородностей, приводящих в свою очередь к уширению доплеровских спектров отраженного сигнала и к  $F$  – рассеянию.

Для объяснения явлений, наблюдаемых в экспериментах, можно использовать модельные оценки условий возбуждения НРТ и образования неоднородностей при формировании периодических колебаний  $N_e$ , обусловленных увлечением заряженных компонент ионосферной плазмы внутренней гравитационной волной естественного происхождения [55,36]. Согласно этим оценкам, эффективное возбуждение НРТ и связанных с ней ионосферных «пузырей» начинается при возникновении в основании  $f$  – слоя неоднородностей  $N_e$ , в которых  $N_e/N_{ef} \sim 0,05 - 0,1$ . Время существования таких возмущений  $N_e$  должно быть соизмеримо с характерным временем линейной стадии развития НРТ, которое для оптимальных условий возникновения НРТ должно составлять  $1/\gamma \sim 300 - 500$  с ( $\gamma$  – инкремент линейной НРТ) в зависимости от параметров ионосферы [55,36]. Согласно численным расчетам амплитуда волны должна составлять  $V_s = 2 - 10$  м/с, фазовая скорость волны  $V_\phi = 100 - 200$  м/с, длина волны  $\lambda = 50 - 100$  км. Помимо того, для возникновения «пузырей»  $N_e$  необходимо выполнение условия пространственного резонанса, обеспечивающее эффективное взаимодействие волны с дрейфовым движением плазмы.

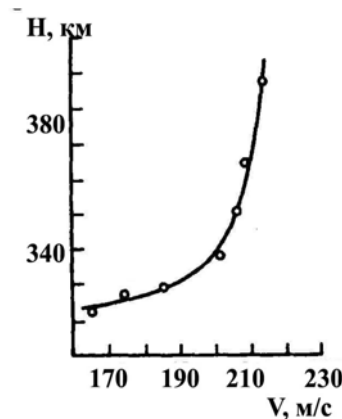


Рис. 18. Скорость распространения волнового возмущения на различных высотах.

Для установления соответствия модельных оценок условий эффективной генерации НРТ экспериментальным данным используем результаты многочастотного доплеровского зондирования для определения параметров волновых возмущений в реальных условиях. Значение фазовой скорости волны, определенное по времени начала волнового возмущения на разных высотах в ионосфере, приведены на рис. 18. Как следует из этого рисунка,  $V_\phi$  составляет 174 м/с на  $h = 325$  км. и 215 м/с на  $h = 365$  км. (при точности оценок  $\pm 10$  м/с). Амплитуда волны, определенная по доплеровскому смещению, составляет около 6 м/с и возрастает с высотой. Период волнового возмущения в ионосфере достигает 300-500 с. По наблюдениям дрейфа ионного облака определено, что зональное электрическое поле имело восточное направление, благоприятное для развития «пузырей» ионизации [55,36]. Таким образом, можно отметить соответствие модельных и экспериментальных данных по условиям возбуждения НРТ и плазменных «пузырей».

В эксперименте ЭТ - 4 заметное развитие  $F$  – рассеяния, которое проявляется в уширении и зашумлении доплеровских спектров, отмечается только вблизи максимума  $F$  – слоя, в то время как на меньших высотах оно наблюдается только при прохождении волнового возмущения, а затем затухает (рис. 16 и 17). Этот эффект объясняется, по-видимому тем обстоятельством, что инкремент линейной НРТ резко возрастает в основании  $F$  – слоя, достигая максимальных значений для условий эксперимента на высотах 400 – 450 км [44-47]. Именно в этом интервале высот отмечен стимулированный запуск  $F$  – рассеяния, имеющего искусственную природу. Дополнительным подтверждением триггерного запуска искусственного  $F$  – рассеяния служит и тот факт, что оно регистрировалось в экспериментах на 20 – 30 мин раньше естественного  $F$  – рассеяния (рис. 16).

В заключение можно констатировать, что:

1. С использованием радиофизических методов в активных экспериментах с инъекцией плазмообразующих составов в экваториальной ионосфере зарегистрировано распространение волновых возмущений в ионосфере вплоть до максимума  $F$  – слоя; эти возмущения могут быть вызваны генерацией внутренних гравитационных волн (ВГВ) при инъекции вещества.

2. Параметры искусственных волновых возмущений в первом приближении соответствуют условиям генерации НРТ при распространении ВГВ в естественных условиях с возникновением в результате этого «пузырей» ионизации.

3. Эффект стимулированного запуска НРТ, проявляющийся в возникновении искусственного  $F$  – рассеяния, отмечается только вблизи и ниже максимума экваториального  $F$  – слоя в области максимальных значений инкремента НРТ.

В целом, результаты экспериментов подтверждают возможность стимулированного запуска в экваториальной ионосфере в определенных условиях искусственного  $F$  –рассеяния, связанного с генерацией и распространением волновых возмущений в ионосфере.

### 3. ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ В ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЕ, ВЫЗВАННЫХ РАБОТОЙ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАКЕТ И СПУТНИКОВ

Запуски мощных ракет и работа двигательных установок (ДУ) космических аппаратов, которые сопровождаются выбросами в околоземную среду на различных высотах газа, плазмы, дисперсных частиц различных размеров, приводят к возникновению искусственных газо-плазмо-дисперсных образований (ИО). Эти образования рассеивают солнечное излучение или, вступая в химические процессы с компонентами атмосферы, возбуждают свечение, в результате чего в околоземной среде могут возникать необычные оптические явления [56]. К настоящему времени получено много данных по ионосферным

эффектам при запусках мощных ракет, которые проявляются в образовании «ионосферных дыр», генерации и распространении волновых возмущений, в возбуждении свечения ионосферы и обусловлены, в основном, взаимодействием газовых продуктов сгорания ДУ ракет с ионосферной плазмой [57-59]. Однако в научной литературе мало внимания уделялось описанию искусственных образований из дисперсных частиц (в ряде случаев используется термин «космозольные образования» [60,61]), сопровождающих запуски ракет и работу ДУ космических аппаратов. В то же время наблюдения оптических явлений, сопровождающих возникновение и эволюцию ИО такого типа, могут дать ценную информацию по проблемам антропогенного загрязнения околоземного космического пространства (например, по проблеме «космического мусора»), динамическим процессам в различных областях околоземной среды, различным вопросам атмосферной оптики, методике и интерпретации результатов активных экспериментов в околоземной среде.

Ниже сделана попытка представить и рассмотреть некоторые результаты оптических наблюдений ИО из дисперсных частиц, зарегистрированных с участием авторов при проведении исследований по воздействию ракетно-космической техники на околоземную среду. Представленные данные наземных и спутниковых наблюдений являются достаточно типичными и отражают характерные особенности динамики и свечения дисперсных ИО, образующихся при запусках ракет.

### 3.1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Наземные наблюдения. Для наблюдений оптических явлений при возникновении ИО использовались:

- фотокамера «Практика» с объективом «Зоннар» с фокусным расстоянием 135 мм, относительным отверстием 3,5; фотографирование осуществлялось на пленку Кодак 2485 с экспозицией 1 с;
- фотокамера «Практика» с предобъективной дифракционной решеткой (600 линий/мм, дисперсия 220 А/мм) и объективом с фокусным расстоянием 58 мм;
- высокочувствительная черно-белая телевизионная камера с длиннофокусным объективом.

Наземные наблюдения проводились в условиях сумерек, когда пункт наблюдения находился в тени Земли, а ИО - выше земной тени. Это обеспечивало оптимальные условия наблюдения ИО, интенсивно рассеивающего солнечное излучение, на фоне темного неба. Наземные наблюдения проводились, как правило, из одного пункта, что ограничивало возможности восстановления трехмерной картины ИО. При проведении наблюдений запусков с полигона в Плесецке пункт наблюдения находился на расстоянии 370 км западнее от точки пуска ракеты и наблюдения осуществлялись почти «в угон» ракете - под углом  $20^\circ$  к плоскости ее траектории. Это обстоятельство позволило определить горизонтальную составляющую радиальной скорости разлета вещества ИО на интервалах времени, соответствующих временным интервалам между фотографиями ИО (10 - 12 с). Дальность до соответствующих положений ракеты вычислялась по траекторным параметрам движения ракеты на активном участке. Границы ИО определялись по изофотам (по уровню фотографической плотности 0,2).

В экспериментах проводились также наблюдения оптических явлений при работе ДУ разгонных блоков космических аппаратов на высоте 20 тыс. км. Для этой цели использовалась высокочувствительная телевизионная установка, с помощью которой осуществлялись наблюдения при углах места  $80 - 85^\circ$ . При этом изображение ИО в картинной плоскости представляло собой проекцию инжектируемой газо-дисперсной струи на плоскость, проходящую через продольную ось струи.

Данные по пространственным и яркостным характеристикам ИО при запусках ракет получались в результате стандартной обработки фотографических материалов. При

этом за границу ИО на изображении брался уровень плотности почернения на 0,2 отличный от фона. По изофотам определялись яркости ИО и определялись значения координат и скоростей. Спектральные изображения в разных интервалах длин волн получались из фотографий ИО, сделанных с предобъективной дифракционной решеткой.

Спутниковые наблюдения. Для спутниковых наблюдений ИО, возникающих при запусках ракет, использовался УФ-телескоп космической астрофизической станции (АС) «Астрон». Наблюдения ИО из космоса в УФ-диапазоне открывают принципиально новые возможности диагностики развития ИО, не достижимые при наземных исследованиях.

Спутник «Астрон» имел орбиту с параметрами: наклонение  $51,5^\circ$ , перигей 2 тыс. км, апогей 200 тыс. км, период обращения 4 суток. Поскольку подробные данные по оптической аппаратуре, установленной на спутнике, представлены в [62], отметим только некоторые из них, важные для интерпретации результатов наблюдений: - спектральные каналы УФ-спектрографа: 1 канал - 241,4 - 350,0 нм, 2 канал - 110,0 - 160,0 нм, 4 канал - 110,0 - 550,0 нм; - угловое поле зрения УФ-телескопа 12 угловых минут, что соответствовало на поверхности Земли кругу радиусом 3 км. при наблюдении с высоты 100 тыс. км; - точность наведения телескопа, производимого разворотом ИСЗ, составляла 5 угловых минут; - точность стабилизации 1,5 угловых минуты; - чувствительность телескопа  $5 \times 10$  Вт/см с.

Для проведения измерений пространственных характеристик ИО при запусках ракет производилось сканирование УФ-телескопом области запуска поперек траектории полета ракеты за счет сложения орбитального движения АС «Астрон» и вращения Земли. Пространственное сканирование осуществлялось при фиксированной длине волны спектрографа.

### 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наземные наблюдения. В качестве примера оптических явлений, сопровождающих запуск ракеты и характеризующих динамику образования ИО, на рис. 19 (фото 1 - 4) приведены изображения ИО, полученные 27.VIII. 1982 г. с расстояния 550 км при запуске спутника «Молния» ракетой «Союз». Первое изображение (рис. 19 (1)) соответствует моменту появления ИО на высоте 105 км. Изображения на рис. 19 (2, 3 и 4) были получены через 17 с, 60 с. и 94 с. после первого изображения.

Из анализа приведенных фотографий следует, что ИО быстро расширяется вверх и тормозится при движении вниз в более плотную атмосферу. Хорошо наблюдается неоднородная структура ИО (рис. 19(3)), просматриваются струи из отдельных двигателей ракеты. Угловой размер ИО по вертикали за время наблюдений достигает  $7^\circ$ .

Полученные данные по горизонтальной составляющей радиальной скорости  $V_R$  разлета вещества ИО с учетом особенностей методики наблюдений, рассмотренных выше, и неточности определения по изофотам границы ИО и положения ракеты на фоне ИО, приведены на рис. 20. Из этих данных следует, что регистрируемая в условиях эксперимента скорость разлета компонент ИО растет с высотой от 1 км/с на высоте  $h = 120$  км. до 2 км/с на  $h = 160 - 170$  км. Поперечный размер ИО, зарегистрированный за время наблюдений, достиг 100 км.

Как указывалось выше, яркость ИО определялась по изофотам. На рис. 21 приведены изменения во времени площадей  $S_1$  и  $S_2$  (в квадратных градусах) с фотографической плотностью 0,2 и 0,8 соответственно и интегральной светимости ИО в долях яркости полной Луны. Спектральные наблюдения показали, что спектр ИО является непрерывным, что свидетельствует о наличии в нем мелкодисперсной компоненты.

Динамика ИО на  $h = 20$  тыс. км при работе ДУ разгонного блока космического аппарата иллюстрируется ТВ-изображением ИО на рис. 22.



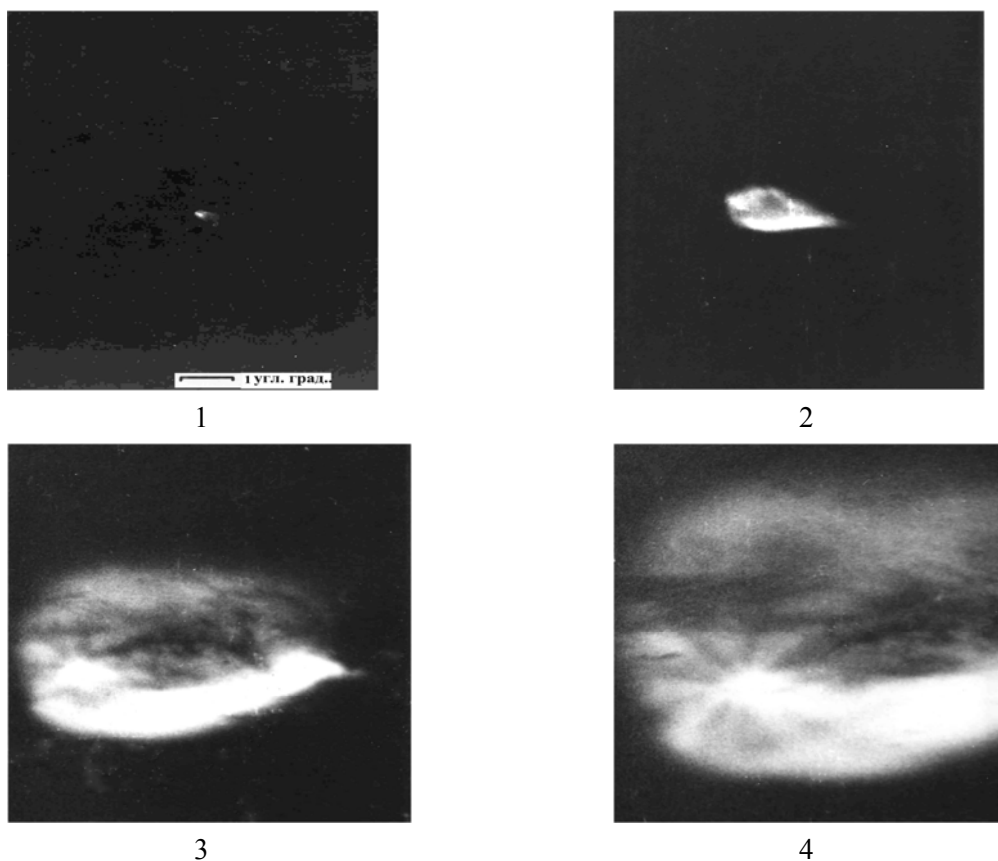


Рис. 19. Последовательные фотографии ИО из конденсированных продуктов сгорания ДУ ракеты «Союз». 1- момент появления ИО; 2, 3, 4 –изображения, сделанные после 17 с., 60 с. и 94 с. На рис.19(1) черточкой указан масштаб угловых размеров.

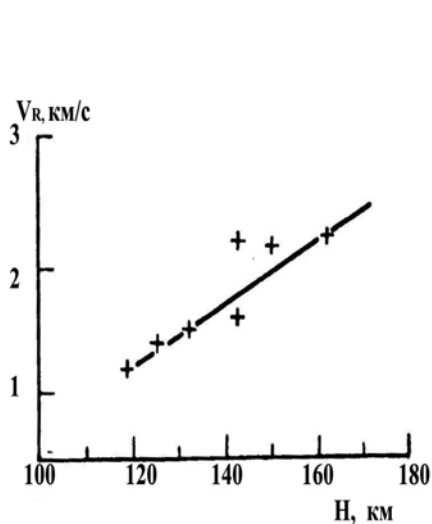


Рис. 20. Горизонтальная составляющая радиальной скорости  $V_R$  разлета вещества ИО в зависимости от высоты  $H$  (применительно к рис. 19).

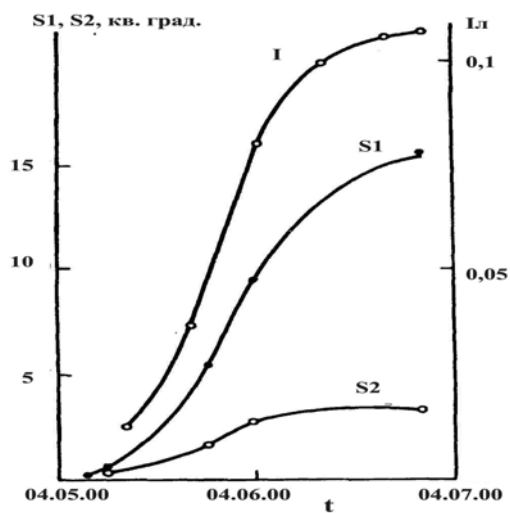


Рис. 21. Динамика изменения во времени  $t$  интегральной яркости  $I$  ИО в долях яркости полной Луны  $I_l$  и видимых площадей  $S1$  и  $S2$  ИО (в квадратных градусах), определенных по изофотам с фотографическими плотностями 0,2 и 0,8 соответственно.

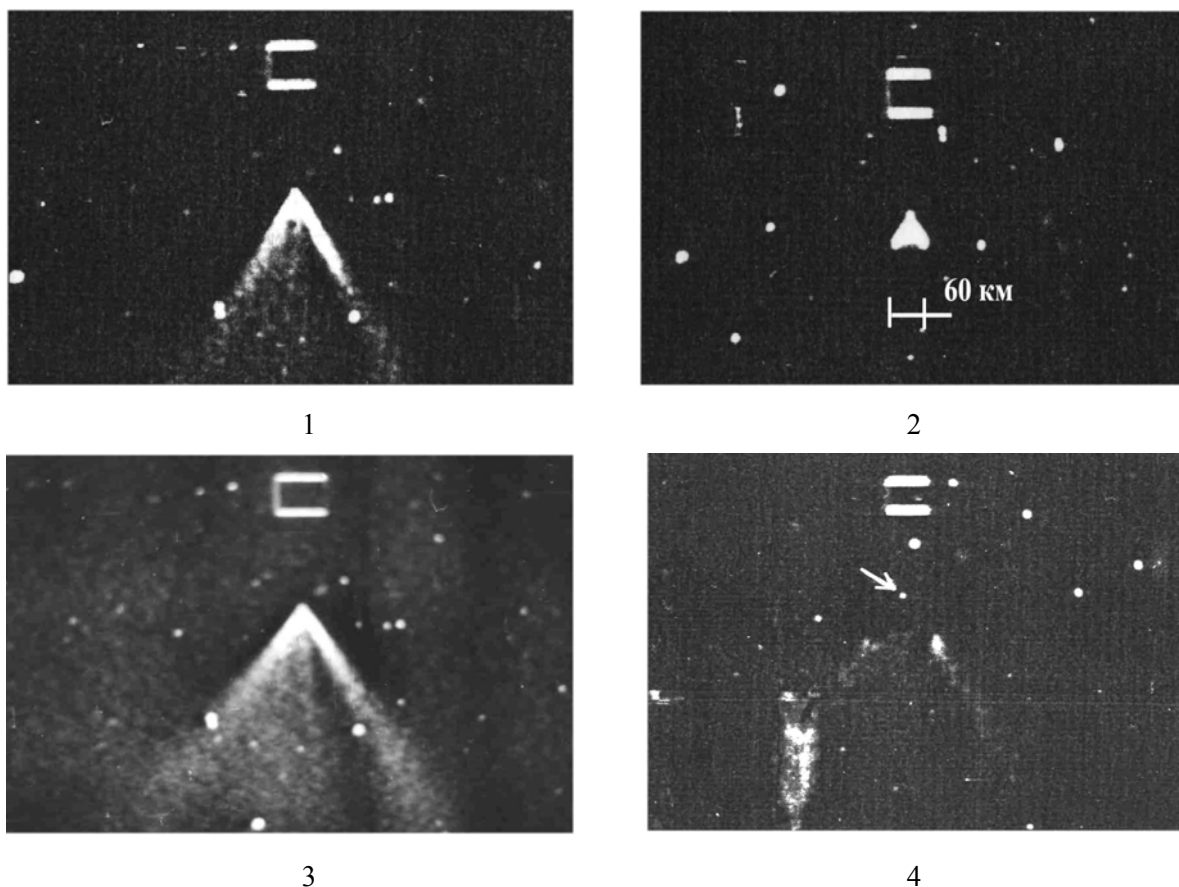


Рис. 22. Последовательные оптико-телевизионные фотографии работы ДУ разгонного блока КА на высоте 20000 км.  
1 - запуск ДУ; 2, 3 – работа ДУ на установившемся режиме;  
4 - отсечка ДУ. Стрелкой на 4 указано положение КА.

Приведенные изображения показывают, что:

- ИО на всех стадиях разлета продуктов сгорания сохраняет коническую форму, обусловленную динамикой истечения продуктов сгорания из ДУ;
- существуют заметно выраженные неоднородности ИО с повышенной концентрацией вещества вблизи образующих конусообразного ИО;
- разлет ИО происходит как единого целого без торможения и изменения формы за время наблюдений;
- скорость разлета компонентов ИО в продольном направлении составляет 3,6 км/с, в поперечном 1,9 км/с.

Перед отсечкой ДУ максимальный наблюдаемый поперечный размер ИО составил 390 км, при этом масса выбрасываемых в 1 секунду продуктов сгорания в 12 раз меньше чем в предыдущем случае.

Спутниковые наблюдения. С использованием УФ - телескопа АС «Астрон» проведены наблюдения ИО при запуске космического аппарата многоразового использования «Спейс Шаттл». Запуск был осуществлен 03.11.1984 г. в 16.00 ДМВ на орбиту с углом наклона 28,5°. Протяженность активного участка составляла 1800 км, время работы двигателя 500 с. Наблюдения были начаты через 2 ч 21 мин. после запуска. При этом АС «Астрон» находилась на  $h = 40$  тыс. км, угол места изменялся от  $15^\circ$  до  $25^\circ$ , азимут составлял  $70^\circ$ . Схема сканирования в эксперименте показана на рис. 23, а данные измерений интенсивности потока излучения на  $\lambda = 275,0$  нм при различных сканах на рис. 6. Нулевому отсчету на шкале абсцисс (рис. 24) соответствует расчетная точка пересечения трассы запуска оптической осью УФ-телескопа.

Из приведенных данных следует, что спустя 3,5 - 4,5 часа после запуска КА Спейс Шаттл вдоль трассы запуска (сканы 6 - 8) регистрируется область с увеличенными по сравнению с фоном значениями УФ-излучения. Поперечный размер этой области достигает 1000 км. Надфоновое увеличение интенсивности УФ-излучения достигает 60%, что значительно превышает ошибки измерений (1 - 3%). Область надфоновое свечения характеризуется значительными флуктуациями интенсивности УФ-свечения, достигающими 10 - 20%. При сканировании областей вне зоны запуска (сканы 1 - 3) увеличения интенсивности УФ-излучения не было зарегистрировано.

Надфоновое увеличение интенсивности УФ-излучения было также обнаружено при наблюдениях области старта ракеты «Протон», который состоялся 29.11.1984 г. Результаты этих наблюдений указывают на существование крупномасштабной области с увеличенной интенсивностью свечения (на 60 - 100% над фоном) после пролета ракеты. В ИО отмечены значительные пространственные неоднородности свечения с размерами до нескольких десятков километров.

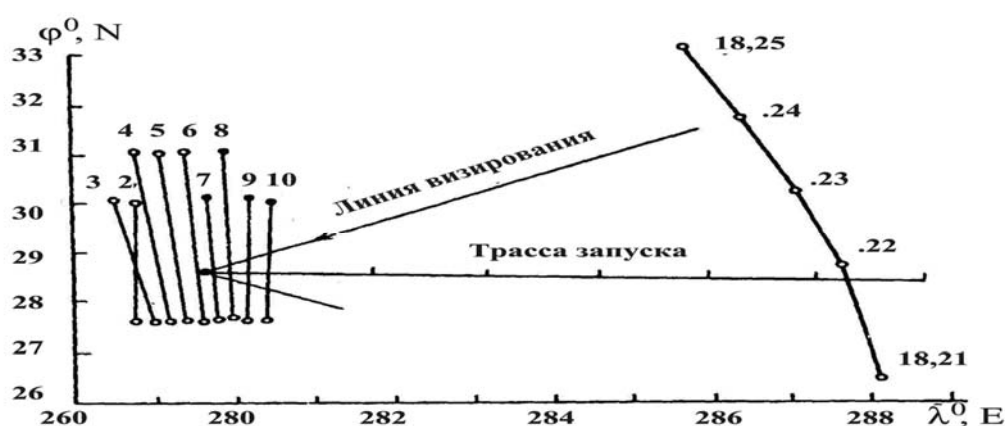


Рис. 23. Схема сканирования района пуска Space Shuttle 03/11/1984 в 16.00 ДМВ ультрафиолетовым телескопом космической АС «Астрон» в географических координатах.

Цифрами указаны номера сканов. 1 – 18.21.00; 2 - 18.36.07; 3 - 18.52.33;  
4 - 19.04.00; 5 - 19.18.08; 6 - 19.35.53; 7 - 19.46.39; 8 - 20.00.22;  
9 - 20.14.38; 10 - 20.28.34.

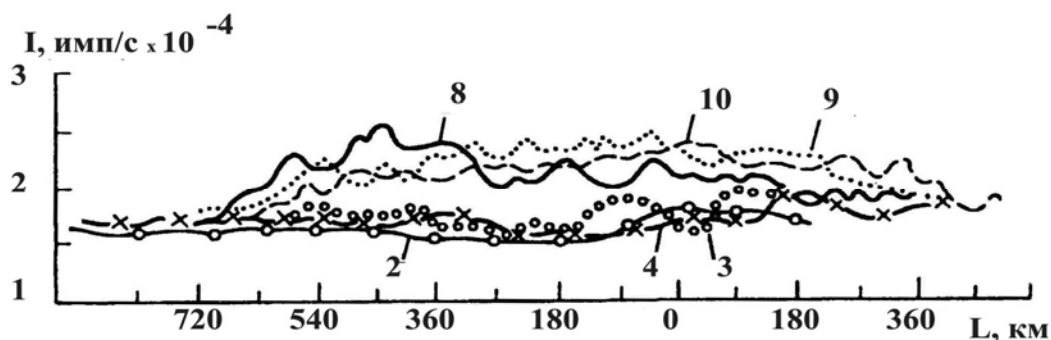


Рис. 24. Изменения интенсивности (число импульсов в сек.) потока УФ излучения на длине волны 275,0 нм для различных номеров сканов (см. рис. 23) в зависимости от расстояния L по земной поверхности.

Нулевой отсчет по оси абсцисс соответствует расчетной точке пересечения трассы запуска оптической осью телескопа АС «Астрон».

### 3.3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Результаты наземных и спутниковых оптических наблюдений ИО, которые возникают при запусках мощных ракет, указывают на следующие особенности:

- регистрируемая инструментальными средствами скорость расширения компонентов ИО на  $h > 100$  км составляет  $1 - 2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ;
- поперечные размеры ИО, образующегося вдоль трассы запуска, могут достигать 1000 км;
- минимальное время существования ИО, определенное различными методами, составляет 1 – 6 часов;
- ИО характеризуется различными пространственными неоднородностями с размерами от единиц до нескольких десятков километров;
- яркость ИО в видимом диапазоне может достигать 0,1% яркости полной Луны; спектры ИО в видимом диапазоне имеют непрерывный характер;
- ИО обладает рассеивающими свойствами в УФ-диапазоне спектра, позволяющими наблюдать их на фоне Земли.

Отмеченные пространственно-временные и спектрально-яркостные характеристики ИО могут быть объяснены при предположении, что рассеяние солнечного излучения происходит на частицах с размерами 1 – 10 мкм. Наличие таких частиц объясняет значительные поперечные размеры ИО, т. е. расстояния, на которых происходит торможение инжектируемых компонент в разреженной атмосфере на высотах  $h > 100$  км. В пользу существования дисперсных частиц в ИО свидетельствует и непрерывный характер видимого спектра излучения, рассеянного ИО. Длительные времена наблюдений ИО связаны с медленным осаждением образованного облака в верхней атмосфере. Так, оценки показывают, что время осаждения дисперсных частиц с размерами  $< 10$  мкм с высоты 100 км превышает 30 дней, в течение которого они могут рассеяться на значительные расстояния.

Двигательные установки ракет-носителей являются мощными источниками дисперсных частиц: так, при работе твердотопливных ускорителей КА Спейс Шаттл образуется около 180 тонн частиц, преимущественно двуокиси алюминия, а при работе жидкостных ракетных двигателей около 30% продуктов сгорания конденсируется с образованием частиц льда [63-65]. Время жизни частиц, образующихся при горении ракетных топлив, и, следовательно, ИО, включающих эти частицы, определяется скоростью их осаждения и диффузии в атмосфере, термодинамическими условиями среды, в которой образовано облако, освещенностью Солнцем и может изменяться в широких пределах - от десятков минут до нескольких часов. Неоднородности ИО, проявляющиеся в неоднородностях свечения, обусловлены особенностями работы ДУ ракет, а на более длительных временах - динамическим режимом верхней атмосферы, в которой образуется облако частиц.

Таким образом, совокупность приведенных данных наблюдений позволяет предполагать, что запуски мощных ракет-носителей сопровождаются, помимо известных явлений образования «ионосферных дыр» и других эффектов [62,63], возникновением долгоживущих (до 1 – 6 часов для разных типов ракет) искусственных образований дисперсных частиц. Образование облаков частиц при запусках ракет может быть одним из источников загрязнения ОКП и должно учитываться при исследованиях антропогенных воздействий на околоземную среду.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс исследований, выполненных в рамках программы «Активные эксперименты и антропогенные явления в ионосфере» показал сложный характер явлений

и процессов при искусственной модификации околоземной среды и самостоятельное значение этого направления исследований околоземной среды. В процессе выполнения программы была выработана специальная методология проведения экспериментов, разработаны аппаратные комплексы как для модификации ОКП, так и для диагностики возникающих при этом процессов и явлений. С использованием разработанных методов, аппаратных средств, моделей в активных экспериментах был зарегистрирован ряд новых процессов и явлений. Диффузионная эволюция ИО в выполненной программе исследовалась комплексно - с использованием оптико-радиофизических методов и трехмерной численной модели. На основе этих исследований удалось впервые обнаружить и объяснить существование долгоживущих ИО в низкоширотной ионосфере. При исследованиях тонкой структуры ИО был зарегистрирован ряд новых особенностей: высотный порог развития неустойчивостей, быстрый, «катастрофический» характер развития неоднородностей в ИО, возникновение «супертонкой» структуры ИО, то есть мелкомасштабных неоднородностей с малым временем жизни и небольшими размерами, возникновение, наоборот, крупномасштабных неоднородностей с размерами в десятки километров и другие особенности. Был зарегистрирован комплекс явлений, свидетельствующих о более эффективном образовании ионов, которое может быть объяснено на основе представлений об аномальной (альвеновской) ионизации. Было выявлено образование крупномасштабных долгоживущих плазменных структур, указывающих на ряд аномальных особенностей в диффузионной эволюции ИО. Данные оптических наблюдений показывают, что химически активные компоненты, инжектируемые с борта ИСЗ на высотах области  $F_2$ , могут вступать в фотохимические реакции с ионосферными составляющими, что приводит к возбуждению надфоновое свечения ионосферы на расстояниях до 100 – 150 км от области инжекции. Особый интерес при исследовании нелокальных явлений и процессов при АЭ представляют результаты, полученные в авроральной ионосфере, подтвердившие возможность стимуляции явлений триггерного типа при модификации проводимости среды в результате создания ИО. Теоретически и экспериментально показана возможность триггерного запуска неустойчивости Релея-Тэйлора и связанных с ней плазменных неоднородностей при искусственной модификации экваториальной ионосферы. Результаты экспериментальных исследований ИО в АЭ и при антропогенных воздействиях показали возможность использования данных АЭ для объяснения и анализа сложного комплекса явлений, возникающих при запусках изделий ракетно-космической техники. К числу таких явлений, которые изучались в проведенных работах, относятся образование крупномасштабных космозольных образований в ионосфере, генерация крупномасштабных и мелкомасштабных возмущений в ионосфере, воздействие плазменных струй ЭР ДУ на ионосферу. Результаты исследований ИО в АЭ и при антропогенных воздействиях, с одной стороны, подтвердили возможность использования данных АЭ для изучения явлений при антропогенных воздействиях и, с другой стороны, еще раз указали на необходимость комплексной диагностики возникающих явлений и процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haerendel G., Sagdeev R. Z. Artificial plasma Jet in ionosphere. Adv.Space Res., 1981, v.1, p 29-44.
2. Авдюшин С. И., Ключев О. Ф., Милиневский Г. П. и др. Предварительные результаты наблюдений искусственных образований в ионосфере в экспериментах по проекту «CRRES». Космические исследования, 1993, Т.31, вып. 1, С.71-83.
3. Милиневский Г. П., Романовский Ю. А., Алпатов В. В. и др. Оптические исследования искусственных облаков в верхней атмосфере. Космические исследования, 1993, Т.31, вып. 1, С.41-53.

4. Багно Ю. Д., Ким В. П., Намазов С. А. и др. Передвижной комплекс многочастотного доплеровского зондирования модифицированной ионосферы в активных экспериментах. *Космические исследования*, 1993, Т.31, вып. 1, С.154-158.
5. Milinevsky G. P., Kashirin A. I., Romanovsky Yu. A. Longlife artificial ion clouds in the earth ionosphere //Abstracts of paper s presented at 19 Annual European Meeting. Sweden, Kiruna., 1992.
6. Гайдуков В. Ю., Лебедева Т. Н., Фаермарк Д. С., Цема А. С. Трехмерная численная модель ионного облака в ионосфере. *Космические исследования*, 1993, Т.31, вып. 1, С.101-107.
7. Dzubenko N. I., Zhilinsky A. P. et al. Dynamics of artificial plasma clouds in "Spolokh" experiments: movement pattern. *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31. N 8. P. 849.
8. Pongratz M. B., Large scientific releasees. *Adv.Space Res.*, 1981,V.1, P.253-273.
9. Николаев Н. В. Динамика плазменных облаков в ионосфере. *Магнитосферные исслед.* 1990, №14, С. 47-63.
10. Аношкин В. А., и др. Об эволюции бариевых облаков большой плотности. *Геомагнетизм и аэрномия*, 1979, Т.19, №6. С.1058-1063.
11. Рожанский В. А., Цендин Л. Д. Столкновительный перенос в частично-ионизованной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1988, 246 с.
12. Филипп Н. Д. и др. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли. Кишинев: Штиинца, 1986, 248 с.
13. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е..Движение и расплывание неоднородностей в плазме. //УФН. 1967., Т.91, №4, С.609-643.
14. Блаунштейн Н. Ш., Цендлина Е. Е., Расплывание сильно вытянутых неоднородностей в верхней ионосфере. *Геомагнетизм и аэрномия*, 1984, т.24, №3, с.414-419.
15. Казачевская Т. В., Иванов-Холодный Г. С. Ракетные данные о поведении электронной концентрации в ионосфере на высотах 100-300 км. *Геомагнетизм и аэрномия*, 1985, т.5, № 6, с. 1008-1024.
16. Рожанский В. А., Цендин Л. Д. Расплывание неоднородностей в слабоионизированной плазмы с током в геомагнитном поле. *ЖТФ*, 1977, Т.47, №10, С. 2017-2026.
17. Namazov S., Nikolaishvili S., Romanovsky Y., Ivanov V. Dynamics and structure of ion clouds in the ionosphere from multifrequency Doppler sounding, *Adv. Space Res.*, 1995, v.15, N12, p.123-126.
18. Евтушевский А. М., Милиневский Г. М., Романовский Ю. А., Савченко В. А. Стратификация бариевых облаков в условиях активных экспериментов по ТВ-наблюдениям. *Космич. исследования*, 1992, Т. 30, вып. 3, С. 123-128.
19. Milinevsky G. P., Alpatov V. V., Gurvich A. V.et al. Optical observations of artificial clouds in the CRRES experiments. *Adv. Space Res.*, 1995, v. 15, N 12, p. 131-134.
20. Гайдуков В. Ю., Намазов С. А., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Эксперимент "Экваториальный триггер": стимулированное развитие плазменных неустойчивостей и неоднородностей в экваториальной ионосфере. *Космические исследования*, 1993, Т.31, вып. 1, С. 63-70.
21. Дзюбенко Н. И., Евтушевский А. М., Лившиц А. И. и др. Оптические эффекты начальной стадии инжекции искусственного ионного облака. *Геомагнетизм и аэрномия*, 1986, т. 26, N. 5.
22. Гайдуков В. Ю., Кащенко Н. М., Корнеев М. А., Романовский Ю. А. Волновые возмущения, генерируемые в термосфере локализованными источниками. *Геомагнетизм и аэрномия*, 1992, т. 32, N 2.
23. Гайдуков В. Ю., Деминов М. Г., Думин Ю. В. и др. Эксперимент "Авроральный триггер". I. Генерация электрических полей и потоков частиц инжекцией плазмообразующих соединений в ионосферу высоких широт. *Космические исследования*, 1993, Т.31, вып. 1, С. 54-62.
24. Алебастров В. А., Благовещенская Н. Ф., Иванов В. П. и др. Исследования искусственных образований в ионосфере радиофизическими методами. 1. Искусственные ионные облака. *Космические исследования*, 1993, Т.31, вып. 2, С. 11-31.
25. Жулин И. А., Милиневский Г. П., Лоевский А. С. и др. Экспериментальные исследования в ионосфере при кумулятивной инжекции паров бария. *Космические исследования*, 1984, Т.23, С. 406.
26. Жулин И. А., Жученко Ю. М., Костин В. М. и др. Регистрация стимулированного высыпания электронов из внутреннегорациационного пояса в эксперименте "Сполох-2". *Космические исследования*, 1980, Т.20, N6, С.1125.
27. Alexandrov V. A., Babaev A. P., Gaydukov V. Yu. et.al. Energetic electron fluxes stimulated with pulsed plasma injections of plasma in the ionosphere. *Adv. Space Res.*, 1981, v.2 ,p.141.

28. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Численное моделирование F-области путем инъекции плазмогасящих соединений. Геомагнетизм и аэрномия, 1988, Т. 28, N 3.
29. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Возможности стимулирования экваториальных плазменных пузырей инъекцией H<sub>2</sub>O. Геомагнетизм и аэрномия, 1989, Т. 29, N 3.
30. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Запуск экваториальных пузырей путем модификации E-слоя. Геомагнетизм и аэрномия, 1991, Т. 31, N 6.
31. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Исследования стимуляционных характеристик различных плазмогасящих соединений. Геомагнетизм и аэрномия, 1991, Т. 31, N 6.
32. Sagdeev R. Z., Managadze F. G., Romanovsky Yu. A. et.al. Peculiarities of the environment disturbances during the electron beam injection from the rocket. Adv. Space Res., 1981, v.1 ,p.77.
33. Трахтенгерц В. Ю., Фельдштейн А. Я. Турбулентный погранслой в полярной ионосфере и взрывная фаза магнитосферной суббури. Неустойчивости и волновые явления в системе ионосфера-термосфера. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 239.
34. Grebnev, Deminov M., Romanovsky Yu. A. and Tcema A. Trigger processes in the artificially modified auroral ionosphere, Adv. Space Res., 1998, Vol.21, No. 5, pp.761-764.
35. Holmgren G., Bostrom R., Kelly M. C. et al. Trigger, an active release experiment that simulated auroral particle precipitation and wave emissions. J. Geophys. Res. 1980. V. 85. № A 10. P. 5043.
36. Козлов С. И., Романовский Ю. А. Искусственная модификация ионосферы в активных экспериментах и при антропогенных воздействиях. Космические исследования, 1993, Т.31, вып. 1, С. 26-40.
37. Fominov O., Tcema A. The generation of direct and AC electric fields and electron fluxes in a rocket experiment. Adv. Space Res., 1995, vol. 15, №12, p.135.
38. Ришбет Г., Гарриотт О. К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
39. Hanson W. B., Sanatanj S. Relationship between Fe ions and equatorial spread F., J. Geophys. Res. 1971. V. 76. № 31. P. 7761.
40. Романовский Ю. А., Погуляевский Л. И., Дубов И. А., Ульянов Е. Г. Об аномалии ионного состава в экваториальной области. ДАН СССР. 1975. Т. 224. № 6. С. 1312-1314
41. Гайдуков В. Ю., Истомин В. Г., Романовский Ю. А. Аномалия состава экваториальной области F<sub>2</sub> в послезаходные часы по данным масс-спектрометрического эксперимента на спутнике «Космос-274»: Препринт 331. ИКИ, 1977.
42. McClure J. P., Hanson W. B., Hoffman J. H. Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere. J. Geophys. Res. 1977. V. 82. № A4. P., 2650-2658.
43. Fejer B. O., Kelley M. C. Ionospheric irregularities. Revs. Geophys. and Space Phys. 1980. V. 18. № 2. P. 401-454.
44. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984.
45. Ossakow S. L., Zalesak S. T., McDonald B. E., Chatuverdi P. K. Nonlinear equatorial spread F: dependence of altitude of the F-peak and bottomside background electron density gradientscale height. J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № A1. P. 17-39.
46. Ossakow S. L. Review of recent results of spread F theory. Wave instabilities in space plasmas. Proc. Symp. XIX URSI. Helsinki. 1978. D.R.P. Co. P. 265-289.
47. Гершман Б. Н. Об условиях возникновения неустойчивости Релея-Тейлора в области F-ионосферы. В кн. Ионосферные неоднородности. Якутск, 1981. С. 3-15.
48. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Численное моделирование модификации экваториальной F'-области путем инъекции плазмогасящих соединений. Геомагнетизм и аэрномия. 1988. Т. 28. № 3. С. 422-427.
49. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Никитин М. А., Романовский Ю. А. Возможности стимулирования экваториальных плазменных пузырей инъекцией H<sub>2</sub>O, Геомагнетизм и аэрномия, 1989, Т. 29, № 3, С. 440-444.
50. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Мациевский С. В. и др. Исследование стимуляционных характеристик различных плазмогасящих соединений, Геомагнетизм и аэрномия, 1991, Т. 31, № 6, С. 1074-1078.
51. Гайдуков В. Ю., Кашенко Н. М., Мациевский С. В. и др. Запуск экваториальных пузырей путем модификации E - слоя, Геомагнетизм и аэрномия, 1991, Т. 31, № 6, С. 1042-1048.



52. Гайдуков В. Ю., Кащенко Н. М., Корнеев Н. А. и др. Волновые возмущения, генерируемые в термосфере локализованными источниками, Геомагнетизм и аэрномия, 1992, Т. 32, № 2, С. 125-131
53. Narcisi R. S. Overview of Project BIME, in Active Experiments in Space. Proc. Symp. Albach 24-28 May 1983. ESA SP-195, 1983, P.255-264.
54. Mendillo M. Ionospheric Holes: A Review pf Theory and Recent Experiments, Adv. Space Res. 1988. V.8, №16, P.51-62.
55. Ерохин Н. С., Кащенко Н. М., Кшевецкий С. П. и др. Резонансное возбуждение внутренними гравитационными волнами релей-тейлоровских ионосферных пузырей в ночной экваториальной F-области:Препринт 1584, ИКИ, 1989, С.15.
56. Платов Ю. В., Рубцов В. В. НЛО и современная наука. М.: Наука, 1991
57. Bernhardt P. A. Environmental effects of plasma depletion experiments. Adv. Space Res. 1982.V. 2. № 3. P. 129
58. Mendillo M. Modification of the ionosphere by large space vehicles. AJAA Paper. 1980.V. 71. P. 99-117.
59. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем (обзор). Космич. исслед. 1980. Т. 18. Вып. 2. С. 266.
60. Буэдыгар Т. В., Гаплевская В. В., Дорохова И. В. и др. Структура и динамика искусственных космозольных образований в верхней атмосфере. Космич. исслед. 1993. Т. 31. Вып.2, С.43-54.
61. Андреева Л. А., Ключев О. Ф., Лортнягин Ю. И., Хананьян А. А. Исследование процессов в верхней атмосфере методом искусственных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1991
62. Боярчук А. А., Границкий Л. В., Северный А. Б. и др. Ультрафиолетовый телескоп на астрофизической станции «Астрон».Письма в астрофизический журнал. 1984. Т. 10. № 3.
63. Новиков Л. С., Петров Н. Н., Романовский Ю. А. Экологические аспекты космонавтики. М.: Знание, 1986.
64. Bernhardt P. A. Modeling of modifications experiments involving neutral gas release. Act.,experim. in space. Albach. 1983. P. 271.
65. Rote D. M. Space systems and their interactions with Earth's space environment//Progress in Astronautics and Aeronautic. AIAA. 1980. V. 71. P. 3-53.

## **Эхо солнечных бурь и галактических событий у поверхности Земли**

В. Б. Лапшин<sup>1</sup>, В. В. Гончарук<sup>2</sup>, Т. В. Гребенникова<sup>3</sup>, Е. В. Широков<sup>4</sup>,  
Д. С. Семенов<sup>5</sup>, В. Н. Морозов<sup>6</sup>, С. С. Плетенев<sup>7</sup>, А. О. Самсоны-Тодоров<sup>8</sup>, В. В. Таранов<sup>2</sup>,  
Н. В. Плотникова<sup>7</sup>, Е. Ю. Фролова<sup>7</sup>, А. В. Сыроешкин<sup>1</sup>

*1- Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*2- Институт коллоидной химии и химии воды имени А. В. Думанского, г. Киев*

*3- Медицинский факультет Российского университета дружбы народов, г. Москва*

*4- Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова*

*5- НИЦ импульсной техники*

*6- Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва*

*7- Государственный океанографический институт, г. Москва*

*8- Предприятие «Аква» Института коллоидной химии и химии воды имени А. В. Думанского, г. Киев*

*e-mail: lapshin-vb@mail.ru, syroeshkin@rudn.ru*

Тепловые нейтроны при значениях потока, соответствующих уровню корпускулярного облучения у поверхности геоида, особым образом взаимодействуют с веществом при высокой напряженности электрического поля (более 100 000 В/см) на межфазных границах. Это явление показано на следующих примерах: дефекты в твердом теле, межфазные границы «металл-раствор», живые организмы. Предложен механизм «виртуальной» ловушки тепловых нейтронов на межфазных границах. Обсуждается роль нейтронного излучения в атмосфере как своеобразного посредника в причинно-следственной цепочке астрогеофизических событий.

Ключевые слова: тепловые нейтроны, межфазные границы, неравновесные процессы

## **ВВЕДЕНИЕ**

Поток тепловых нейтронов у поверхности геоида определяется в основном последствиями термализации нейтронов, рожденных ядерными реакциями от корпускулярного облучения верхней и средней атмосферы [1]. Вблизи земной коры более 70% нейтронов имеют энергию 0,45 эВ [2]. На уровне моря плотность потока тепловых нейтронов не превышает 30 н/(с×м<sup>2</sup>), слабо изменяясь с широтой, и достигает к тропопаузе значений 2000 н/(с×м<sup>2</sup>) [3]. Такие потоки тепловых нейтронов оказывает значительное влияние (чаще всего активирующее) на биологические объекты [4, 5]. Наличие значительных биологических ответов на слабые потоки тепловых нейтронов позволяет предполагать, что эти корпускулярные потоки являются одним из факторов, позволяющих живым организмам ощущать целый ряд астрогеофизических событий [6], в дополнение к известным климатическим факторам. В настоящее время в России и мире проводится мониторинг высокоэнергетической андронной компоненты на ряде стационарных мониторов (ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, Институт солнечно-земной физики СО РАН). Мониторинг пространственно временной изменчивости нейтронного потока в тропосфере Северного и Южного полушария, Евразии, высокоширотных районах Арктики позволил выявить аномально высокие всплески нейтронного излучения (от 300 до 5000 н/(с×м<sup>2</sup>), различной длительности и повторяемости) в наземных биоценозах и над скопления фитопланктона [3, 7]. Выяснению механизма этого явления посвящена

настоящая статья. Мы предположили, что живые организмы, как многофазная гетерогенные системы могут выступать в качестве виртуальной нейтронной ловушки подобно описанное ранее для гетерогенных замедлителей ядерных реакторов [8]. Хорошо известны несколько способов накопления нейтронов. Например, классический способ накопления ультрахолодных нейтронов [9] в замкнутых сосудах, основанный на том, что с уменьшением энергии нейтрона (увеличением его длины волны) действительная часть показателя преломления уменьшается и, начиная с некоторой граничной для материала сосуда длины волны нейтроны в среде материала сосуда распространяться не могут и будут отражаться от поверхности сосуда при любых углах падения. Другой вариант - способ образования ультрахолодных нейтронов в квазисвязанном состоянии в многослойных мишенях, при его появлении в поре или микротрещине с поперечным размером, сравнимым с длиной волны ( $\sim 10$  нм) [10], то есть в условиях, когда нейтрон находится в яме, создаваемой скачками потенциала на межфазной границе. Известен также способ образования квазисвязанных состояний ультрахолодных нейтронов при замене межфазной границы полем тяготения [11], при котором потенциальная яма формируется гравитационным полем и отражающей стенкой. Получены методы получения, накопления и хранения ультрахолодных нейтронов с применением нейтронотводов, механических устройств и сверхтекучего гелия при различных режимах накопления [12, 13]. Хорошо известен способ удержания ультрахолодных нейтронов в магнитной ловушке, обеспеченный зависимостью энергии взаимодействия нейтрона от ориентации спина и связанного с ним магнитного момента, так что нейтронам, спин которых ориентирован против поля, магнитное поле будет оптически менее плотной средой по сравнению с вакуумом [14].

Наиболее близким к живым системам аналогом образование ловушки для медленных нейтронов является эффект виртуальной нейтронной ловушки ядерного реактора при нестационарном переносе нейтронов в замедляющих гетерогенных средах (например, в системе вода-графит). Этот эффект обусловлен тем, что скорость взаимодействия нейтронов в образце существенно меньше, чем в среде, так, что при этом поведение нейтронной плотности во времени отклоняется от экспоненциальной для гомогенной среды за счет накопления медленных нейтронов в ловушке [8].

Для подтверждения выдвинутой гипотезы о своеобразной адсорбции нейтронов на межфазных границах использованы различные объекты, облучаемые тепловыми нейтронами: 1) дефекты в твердом теле (кварц), 2) электрохимическая ячейка, 3) живой организм (бактериальная суспензия и порошкообразный препарат цист *Artemia salina*). Представленные ниже результаты указывают на повышенную чувствительность гетерогенных систем к облучению нейтронами тепловых энергий при сверхслабых интенсивностях.

## МЕТОДЫ

Контроль за временным ходом нейтронного потока осуществляли с помощью мобильной установки, состоявшей из 6 газоразрядных датчиков СНМ 18, (наполнение – 97%  $^3\text{He}$  + 3% Ar, 405 кПа), работающие в пропорциональном режиме, данные от которых выводились через АЦП на компьютер. Чувствительность детектора к нейтронам тепловых энергий (0,02 – 0,5 эВ) около  $180 \text{ имп.}\cdot\text{см}^2/\text{н}$ . Установка обеспечивает регистрацию не менее 80% нейтронов тепловых энергий. Счёт нейтронов проводили каждые 3 минуты. Счет (в течение 10 минут) фоновых нейтронов на двух детекторах, расположенных рядом, различается не более, чем на 10% при доверительной вероятности 0,99 ( $n = 500$ ).

Контроль астрофизических событий. Временной ход андронной компоненты наземного уровня вторичного излучения космических лучей с энергиями более  $> 100 \text{ МэВ}$  контролировался по данным нейтронного монитора 24NM64 ИЗМИРАН, г. Троицк,

Московской обл., (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>). Следует подчеркнуть, что представленные результаты измерений проводились во время «спокойной» космической погоды согласно данным ИЗМИРАН (<http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/events.htm>).

Установка для облучения нейтронами состояла из источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , (ИНК1-06, активность –  $1,42 \cdot 10^4$  н/с ( $\pm 8\%$ )) или плутоний–бериллиевой пары, замедлителя нейтронов (полиэтилен), поглотителя гамма-излучения (свинец) специализированных кювет для твердых образцов, жидкостей и сыпучих материалов цист артемий. Измерение плотности потока нейтронов от радиоактивных источников дополняли расчетом мощности эквивалентной дозы и энергетического спектра по методу Монте-Карло [14] с учетом реальной геометрии установки.

Электроосаждение никеля. Латунный катод ( $0,9 \times 0,1$  дм<sup>2</sup>) обезжиривали этанолом и активировали в 10% растворе серной кислоты. В качестве анода использовали никелевый электрод. Никелирование проводили в электролите фирмы «Экомет» (<http://ecomet.ru>), содержащей: сульфат никеля – 250 г/л, хлорид никеля – 50 г/л, борная кислота – 25 г/л, блескообразующая добавка «ЭКОМЕТ-Н1А» - 1,5 г/л, блескообразующая добавка «ЭКОМЕТ-Н1Б» - 5 г/л (рН = 4,5). Плотность тока – 7,8 А/дм<sup>2</sup>, создаваемой с помощью источника постоянного тока Б5-47. Температура раствора – 20°C.

Выращивание бактериальной культуры (суспензия). Одну колонию клеток *E. coli* (штамм ДН5α) пересевали в 10 мл среды «LB» (рН 7,5) содержащей 10% пептона, 0,5% дрожжевого экстракта, 1% NaCl с концентрацией ампициллина 100 mg/ml. Пересев клеток осуществляли с помощью пастеризованной в пламени платиновой петли и растили в течение ночи при 37°C с аэрацией. Клетки растили до оптической плотности 0,6 ( $\lambda=600$  нм). Полученный объем бактериальной суспензии был поделен на две порции по 50 мл в пробирки типа «Falcon».

Пробоподготовка бактериальной суспензии для элементного анализа. 1 мл суспензии клеток инкубировали с царской водке (6 мл) в течении 1 суток в тефлоновых бомбах. Далее минерализацию образцов проводили под давлением в микроволновой печи MDS2000 при следующем режиме: 2 мин. 20 сек. - при 80% мощности, 5 мин. - при 100% мощности. Во всех опытах вели обработку и последующий анализ трех параллельных проб.

Определение содержания металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Содержание металлов в минерализованных образцах определяли с помощью атомно-адсорбционного спектрометра «SpectrAA-800» с электротермической атомизацией и эффектом Зеемана по протоколу фирмы "Varian" с модификациями по результатам международной интеркалибрации с лабораторией MEL МАГАТЭ (Монако). Источником излучения служили одноэлементные лампы полого катода SpectrAA фирмы "Varian". Ток ламп для элементов Cd, Cu, Ni - 4,0 мА; для Pb, Mn - 5,09 мА; для Cr - 7,0 мА. Ширина щели монохроматора составляла 0,5 нм, за исключением измерений Cr и Mn (0,2 нм). Были использованы режим коррекции базовой линии и горячий впрыск – 50 °C, кроме Ni и Mn – 60 °C. Были использованы следующие длины волн (резонансные линии) и модификаторы: Cd -  $\lambda=228,8$  нм,  $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; Pb -  $\lambda=283,3$  нм,  $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ; Ni -  $\lambda=232,0$  нм,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{Pd}(\text{NO}_3)_2$ ; Cr -  $\lambda=357,9$  нм,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ; Mn -  $\lambda=279,5$  нм,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ; Cu -  $\lambda=327,4$  нм,  $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2$ ; Al -  $\lambda=396,2$  нм,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{Pd}(\text{NO}_3)_2$ ; Zn -  $\lambda=213,9$  нм,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ . Относительное стандартное отклонение при определении с доверительной вероятностью 0,95 не превышало 20% для Cd и Cu и 15% для Pb, Ni, Cr, Mn [15].

Измерение дисперсных характеристик гетерогенных систем. Размерные спектры и концентрацию дефектов в кварце, распределение клеток по размерам и форме регистрировали с помощью дифракции лазерного света на лазерном дифракционном определителе размером частиц («particle sizer») «Malvern 3600 Ec» и малоугловом измерителе дисперсности ИДЛ-1 (ИКХХВ-ГОИН). Принцип работы заключается в следующем. Маломощный гелий-неоновый лазер излучает монохроматический пучок

света ( $\lambda_{\text{max}}=633$  нм), который проходит через экспериментальную ячейку. С помощью линз Фурье дифракционная картина фокусируется на мультиэлементном фотоэлектрическом детекторе. Детектор непосредственно связан с компьютером, осуществляющим весь комплекс обработки данных, начиная от интегрирования набора дифракционных картин, отражающих мгновенное распределение частиц по размерам. В экспериментальном образце все частицы проходят освещенную зону за счет непрерывного перемешивания. Для анализа распределений клеток по размерам и форме были использованы два вида зависимостей:  $n_i=f(r_i)$  и  $v_i=f(r_i)$ , где  $n_i$  и  $v_i$  – соответственно численные и объемные доли размерной группы  $r_i$ . [16,17]

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основной задачей настоящей статьи являлось объяснение избыточной эмиссии тепловых нейтронов в биоценозах и сверхвысокая чувствительность живых организмов к сверхслабым потокам тепловых нейтронов [3, 7, 18, 19], соответствующих фоновому уровню в тропосфере. Формирование предполагаемой ловушки нейтронов, позволяющей накапливать тепловые, холодные и ультрахолодные нейтроны и высвободить их с заданной задержкой по времени, было осуществлено по следующей схеме: на пути потока нейтронов, устанавливался гетерогенный поглотитель с неоднородным электрическим полем в объемной фазе, внешних и внутренних межфазных зонах с напряженностью выше  $10^5$  В/см за счет искусственных и природных источников электрического поля. Соответствующий градиент электрического потенциала может быть достигнут в следующих системах:

1) «Статическое» кристаллическое поле при дефектах кристаллической решетки может достигать  $10^9$  В/см. В нецентросимметричном кристалле внутрикристаллическое поле может воздействовать на нейтрон, причем величина воздействия зависит от направления движения частицы относительно кристаллографических плоскостей [20]. Для этого был выбран твердотельный объект – кварцевое стекло КС4, с лазер-индуцированными дефектами.

2) Поле в межфазной зоне электрод-раствор при формировании потенциала Штерна-Гельмгольца) может достигать  $10^7$  В/см [21]. Для этого был выбран неравновесный процесс электроосаждения никеля.

3) Стационарный (усреднённый) трансмембранный потенциал на биомембране может достигать  $10^7$  В/см и - при локальных значениях до  $10^{10}$  В/см [22-24]. Для этого была выбрана бактериальная суспензия и порошкообразный препарат артемий. Следует подчеркнуть, что мы использовали живые и мертвые (убитые длительным нагреванием при  $70^\circ\text{C}$ , не имеющие межфазного ионного градиента, но сохранившие морфологическую структуру) препараты цист артемий.

В литературе известны также и другие, нереализованные в настоящей работе, способы создания сверхвысокой напряженности электрического поля, например, при лазер-индуцируемой трансмутации [25].

### *1. Нейтрон-индуцированное дефектообразование в кристалле.*

Облучению тепловыми нейтронами с плотностью потока до  $10\,000$  н/(с $\times$ м $^2$ ) были подвергнуты параллелепипедные образцы кварцевого стекла (КС4) (1х1х4 см $^3$ ) с наличием дефектов и без таковых. Дефекты были сделаны в кварце с помощью фокусированного лазерного излучения по технологии фирмы «Ламбит» (<http://lambit.com.ua>) в концентрации 2200 штук на куб. см при усредненном диаметре – 6 мкм. Внешний вид дефекта в кварцевом стекле показан на рисунке 1.



Рис. 1. Фотография лазер-индуцированного дефекта в кварцевом стекле.

Видно, что от центрального ядра расходятся трещины в стекле, образованные при сфокусированном «точечном» разогреве образца. Форма образцов позволила измерять концентрацию и размер дефектов методом лазерного малоуглового светорассеяния [26, 27]. Оказалось, что воздействие нейтронного излучения приводит к шестидесятикратному увеличению объемной доли дефектов в кварцевом стекле, уже имевшем заправки – неоднородности в кристалле (рис. 2-А, линия 1), тогда как в intactных образцах кварцевого стекла рост объемной доли дефектов незначителен. На рис. 2-В иллюстрируется явление «расширения» дефектов в кварцевом стекле, уже имевшем заправки, выжженные лазером.

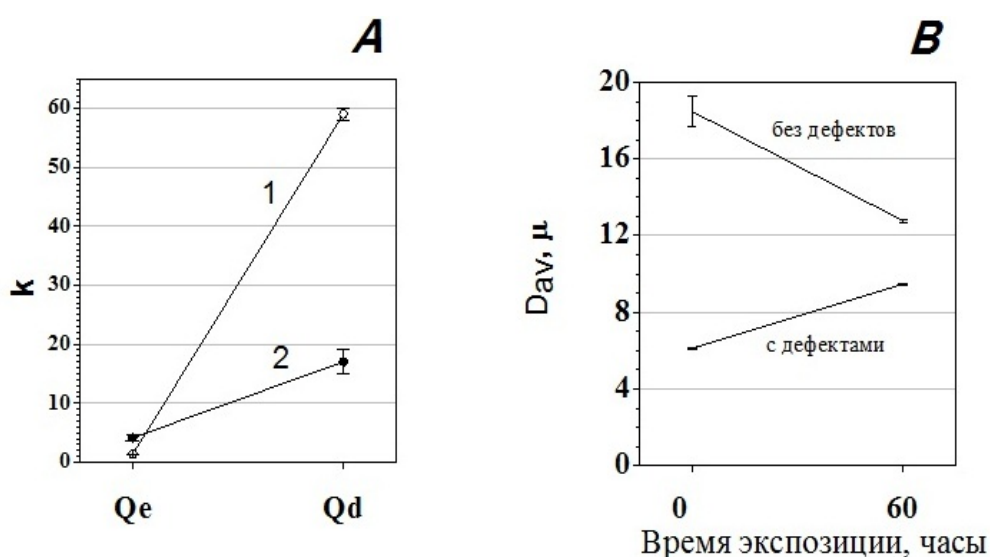


Рис. 2. Индукция тепловыми нейтронами плотностных неоднородностей в кварцевом стекле с уже имеющимися дефектами (А, Qd) и intactном образце (А, Qe). Счетная концентрация предварительно созданных дефектов – 2200 штук на куб. см, объемная концентрация – 0,0003 %.  $k$  – коэффициент увеличения объемной (линия 1) и счетной (линия 2) концентрации дефектов в кварцевом стекле после нейтронного облучения.  $D_{av}$  – средний диаметр дефектов в кварцевом стекле.

При этом снижение среднего диаметра плотностных неоднородностей в intactном кварцевом стекле указывает на их формирование при нейтронном облучении de novo. Это подтверждает и значительное различие в счетном дефектообразовании между кварцевым

стеклом с имеющимися затравками по сравнению с «чистым» кварцевым стеклом (рис. 2-А, линия 2). Рост дефектов в кристалле вызван, по-видимому, хорошо известным  $\beta$ -распадом нейтрона. Большая эффективность дефектообразования в кварцевом стекле с лазерными затравками (рис. 1) может быть вызван наличием межфазных границ с кристаллическими полями в дефектных зонах, способствующих кинетической задержке теплового нейтрона при его пролете в образце.

2. *Никелирование латунных покрытий.* Было показано [28], что при электролизе водного раствора с использованием медного катода эффективное сечение поглощения тепловых нейтронов в меди увеличивается в 20 раз. Эти данные позволили предположить, что захват тепловых нейтронов при электролизе позволит влиять на качество гальванических покрытий за счет, в первую очередь, альтерирования начальных стадий роста новой фазы. Фотография электродов при наличии (образцы №1 и №2) или отсутствии (образцы №3 и №4) нейтронного потока показана на рис. 3.



Рис. 3. Результаты электроосаждения никеля на латунные пластинки при облучении тепловыми нейтронами (№1 и №2) от радиоактивного источника и без такового (№3 и №4), через 3 минуты протекания электрохимического процесса (образцы №1 и №3) и через 9 минут (образцы №2 и №4).

Образцы №1 и №3 – получены после 3-х минутного электроосаждения никеля, а образцы №2 и №4 – после 9 минут электроосаждения. Никелирование проведено при пониженной температуре (оптимальная – 55 °С), что позволяет лучше продемонстрировать эффект облучения нейтронами. Из фотографии видно (рис. 3), что нейтронный поток (образцы №2 и №1) как бы восполняют недостающую для полного покрытия поверхности плотность тока. Кроме того, как следует из сравнения образцов №2, №4, №1 при наличии потока нейтронов фаза никелевого покрытия не расслаивается и обладает лучшей адгезией к подложке, что указывает на более высокую плотность точек роста новой фазы.

3. *Накопление металлов в бактериальной суспензии.* Нами обнаружено, что потоки элементов и относительные элементные профили могут хорошо описывать превращения клеток и физиологическое состояние клеточной культуры [29, 30]. Процессы транспорта металлов через мембрану клеток обеспечиваются за счет трансмембранного электрохимического потенциала (по  $H^+$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  и др -  $\Delta\mu$ ), поддерживаемого клетками в стационарном режиме за счет непрерывной затраты энергии. Таким образом,  $\Delta\mu$  на внешней мембране клетке (толщина  $\sim 5$  нм) можно рассматривать как синоним жизни.



Было предположено, что увеличение захвата тепловых нейтронов обусловлено особенностями строения межфазных слоев. Тогда следовало ожидать влияние слабого потока тепловых нейтронов на метаболизм металлов в живых клетках.

Влияние потока нейтронов было обнаружено по изменению содержания Cd и Pb (см. таблицу 1). Для элементов Al, Cr, Mn, Ni, As, Cu, Zn, As отличий между контрольным образцом суспензии и экспонированным образцом не выявлено. Следует отметить, что для используемого штамма из перечисленных элементов достоверно регистрируется при росте изменение концентрации хрома и свинца.

Таблица 1

Изменение концентрации элементов в бактериальной суспензии при облучении тепловыми нейтронами ( $2000 \text{ н}/(\text{с} \times \text{м}^2)$ ).  
Концентрации элементов указаны в нормировке к общему объему суспензии (мкг/л).

	контроль	+ n
<b>Pb</b>	14	37
<b>Cd</b>	0,0	0,2

Величины накопления элементов (в шт.) намного порядков превышают число нейтронов прошедших через биомассу клеток. Поэтому следует говорить о влиянии потока нейтронов на состояние межфазного слоя в целом. Накопление элементов в суспензии играет роль последующего усилителя. Таким образом, живые клетки, характеризующиеся наличием трансмембранного потенциала можно детектировать по изменению спектра тепловых нейтронов или по влиянию нейтронного потока на скорости метаболизма металлов. Судя по данным настоящего эксперимента тепловые нейтроны увеличивают значение скоростей накопления. Для используемого штамма бактерий мы с трудом детектируем накопление металлов за 20 часов в идеальных условиях роста ( $36^\circ\text{C}$ , на качалке), тогда как в настоящем эксперименте удалось обнаружить различия уже за два часа в условиях, когда бактерии практически не растут. Следует подчеркнуть, что по данным лазерной дифракции (объемная концентрации дисперсной фазы) клетки не разрушались при экспозиции суспензии в потоке нейтронов. Более того, происходило диспергирование клеточных ассоциатов, регистрируемое по увеличению удельной площади поверхности частиц дисперсной фазы с 6 до  $7 \text{ м}^2/\text{см}^3$ . Как следует из работ [31, 32], последнее указывает на стимулирующее (в физиологическом отношении) действие слабого потока тепловых нейтронов на бактериальную культуру.

4. Прохождение тепловых нейтронов через живые и мертвые образцы цист артемий. При облучении образца сыпного порошка цист *Artemia salina* состояла из источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  с  $14200 \text{ н}/\text{с}$  ( $\pm 8\%$ ), замедлителя нейтронов, кюветы для цист, коаксиально охватывающий газоразрядный  $^3\text{He}$  счетчик нейтронов. Детектор нейтронов через усилитель-дискриминатор был подсоединен к устройству счета импульсов. Плотность потока нейтронов от источника и энергетический спектр рассчитывали по методу Монте-Карло. Счет нейтронов во всей установке в сборе проводили не менее, чем в 11 повторях, в течение не менее, чем 300 с, со средним квадратичным отклонением 0,6% при доверительной вероятности 0,95. Идентичность состава живых и мертвых (без межфазного мембранного градиента электрохимического потенциала) цист подтверждали с помощью CNHS-анализатора, рентгено-флуоресцентной спектрометрии, ЯМР спинного эха, атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией и

зеэмановской коррекцией фона. Наблюдали различия во взаимодействии живых и мертвых цист *A. salina* с нейтронами (эффект «ловушки» в живых цистах - рис. 4), что показывает особое, описанное выше изменение состояния вещества в живых клетках: наличие трансмембранного потенциала до 250 мВ на биомембранах толщиной 5 нм образует сверхвысокий градиент электрического поля. Это приводит как к химическим эффектам (1 и 2 эффект Вина), так и к поляризации ядер, что, в свою очередь, меняет характер взаимодействия вещества с нейтронами (в том числе и ядерной прецессии нейтронов [33]).

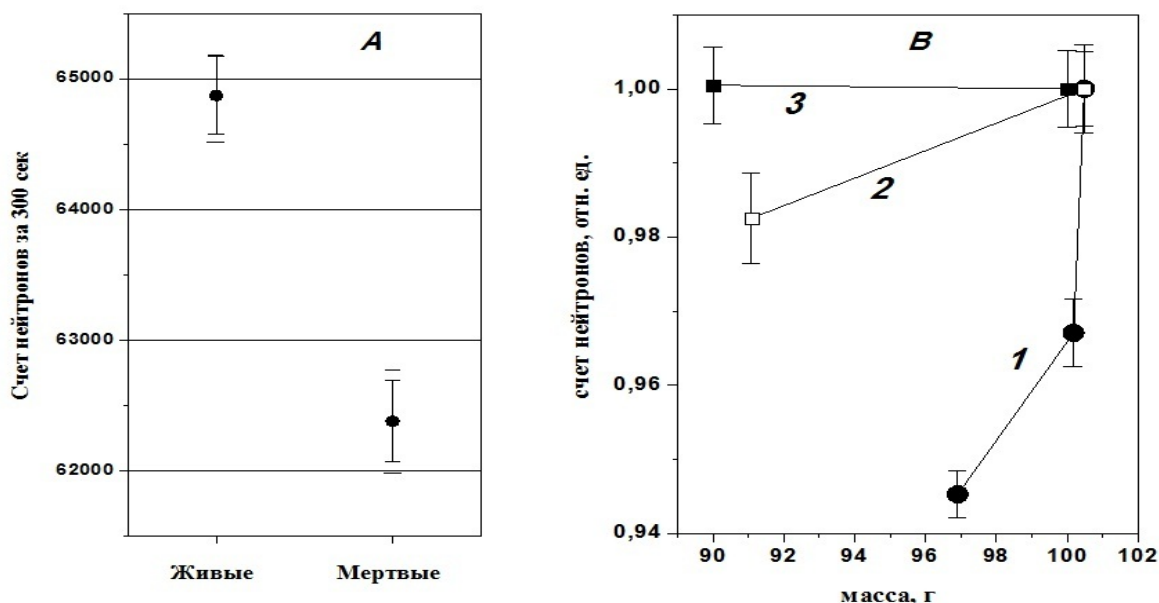


Рис. 4. Взаимодействие живых и мертвых спор *A. salina* с тепловыми нейтронами.

А) Счет (за 300 сек. экспозиции) после прохождения нейтронов через слой живых и мертвых спор. Масса образцов составляла 100,48 г, насыпная плотность – 0,53 г/см<sup>3</sup>. Сверху и снизу от разброса данных указаны максимальные и минимальные значения счета. Счет нейтронов на всей установке в сборе проводили в течении 300 сек не менее, чем в четырех повторях, со средним относительным стандартным отклонением менее 0,6% при доверительной вероятности 0,95. Счет фоновых нейтронов на установке в сборе (вместе с образцами спор) не превышал 0,05% от экспериментального сигнала.

В) Зависимость счета нейтронов от массы образца спор. За одну относительную единицу (1 отн. ед.) счета были приняты следующие значения: для живых спор (кривая 1) – 64872 н за 300 сек, для мертвых спор (кривая 2) – 61291 н за 300 сек. Теоретическую зависимость (кривая 3) рассчитывали исходя из следующего усредненного элементного состава живого вещества: (Н – 10%, О – 62%, С – 22%, N – 3%, Р – 1%, Са – 2%).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженные нами эффекты нейтрон-индуцированного дефектообразования в твердом теле, различия во взаимодействии живых и мертвых цист *A. salina* с нейтронами, влияние нейтронного облучения на кинетику роста новой фазы в слое Штерна-Гельмгольца и на процессы межфазного массопереноса в живых клетках указывают, с нашей точки зрения, на измененное состояние вещества при сверхвысоком напряжении электрического поля. Это подтверждается данными других групп по изменению взаимодействия нейтронов с веществом сильных внутрикристаллических полях [34]. Это приводит как к химическим эффектам (такие значения  $E$  отвечают условиям реализации второго эффекта Вина – сверхвысокой подвижности ионов за счет «потери» гидратной оболочки), так и к поляризации ядер, что, в свою очередь, меняет характер

взаимодействия вещества с нейтронами (известное явление ядерной прецессии нейтронов [33]. Нейтронная ловушка проявляется при условии концентрации гетерогенных поглотителя, в которой вещество находится в условиях  $E > 10^5$  В/см, не менее 0,0001 %.

Кинетически накопление нейтрона в межфазных слоях при наличии сверхвысокой напряженности электрического поля может быть описано минимальной кинетической схемой, представленной на рис. 5.

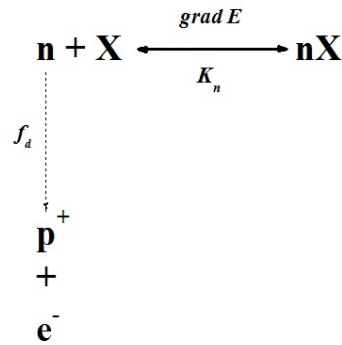


Рис. 5. Кинетическая схема накопления нейтрона в межфазных слоях при высокой напряженности электрического поля ( $\text{grad } E$ ).  $f_d$  – вероятность распада нейтрона.

$X$  – химический элемент.  $K_n$  – константа равновесия.

Константа равновесия радиационной химической реакции  $K_n = [\text{nX}]/[\text{n}][\text{X}]$  [35] зависит от полного сечения рассеяния нейтрона в данной среде, от сечения захвата в данной среде, напряженности электрического поля, энергии нейтрона. Уравнение для наблюдаемого (кажущего) времен жизни нейтрона будет выглядеть согласно кинетической схеме на рис. 5 следующим образом:

$$^{\text{obs}}\tau = (1 + K_n (\text{grad } E)) / f_d \quad (1)$$

Формула справедлива при условии, что характерное время распада нейтрона значительно превышает характерное время реакции  $X + n = \text{nX}$ .

При условии увеличения  $K_n$  с возрастанием  $\text{grad } E$ , возможно накопление нейтронов с последующим выпуском (при сбросе межфазного потенциала) избыточных нейтронов в течении суток [3].

Состояние «адсорбированного» нейтрона –  $\text{nX}$  – соответствующее известным в ядерной физике и радиационной химии метастабильным состояниям атомов, компаунд-ядрам [36], может быть реализовано при максимальном замедлении нейтрона, что возможно как за счет топологии межфазных слоев (например, при латеральном в межфазном слое траектории движения) нейтрона, так и за счет особого состояния вещества и нейтрона при сверхвысокой напряженности электрического поля. Изменение квадрупольного и дипольного моментов ядер при сверхвысокой (более 100 000 В/см) напряженности электрического поля хорошо известны и используются, например, в методе квадрупольного ядерного резонанса [37]. Увеличению локального градиента электрического поля свыше  $10^{10}$  В/см может способствовать первый и второй эффекты Вина, развивающиеся при напряженности электрического поля свыше 1000 В/см [38]. При сверхвысоких значениях напряженности, в том числе неоднородного, электрического поля поляризация ядра и поляризация нейтрона (включая индуцированный дипольный момент) приводят к образованию ядерно-нейтронного аддукта ( $\text{nX}$  – на рис. 1) с вероятностью не менее 0,3 без слияния с нейтроном, что приводит к появлению обратимости, отображенной на кинетической схеме (рис. 5).

Описанный способ накопления нейтрона в межфазных слоях при изложенном походе «адронной» химии является адсорбцией и стабилизацией неустойчивого изотопа водорода в межфазных слоях, зависимой от напряженности электрического поля, подобного образованию промежуточного компаунд ядра при мюоном или пионом захвате [39, 40]. Ряд экспериментов по эмиссии нейтронов (например, [41]) могут быть объяснены с точки зрения, изложенной в настоящей статье.

Аномальные всплески нейтронного излучения в биоценозах (биоэлектрохимических мембранных системах) [3, 7], по-видимому возможны за счет синхронизированного «выпуска» накопленных нейтронов при выключении поля внешнего источника электрического поля, что происходит при регуляции осмотического потенциала в растениях при циркадианном ритме. Сильнейшие метаболические реакции живых организмов [18, 19] на слабые потоки нейтронов позволяют предполагать, что нейтроны являются одним из основных «посредников», позволяющих живым организмам ощущать целый ряд астрогоеофизических событий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепловые нейтроны при ультраслабых потоках, соответствующих уровню корпускулярного облучения у поверхности геоида, особым образом взаимодействуют с веществом при высокой напряженности электрического поля (более 100 000 В/см) на межфазных границах. Это явление показано на следующих примерах: дефекты в твердом теле (усиление нейтрон-индуцированного дефектообразования в кварце при наличии трещиноватых неоднородностей), межфазные границы «металл-раствор» (усиление электроосаждения металла из раствора его соли на электрод), живые организмы (прохождение нейтронов через порошкообразные живые цисты рачка *Artemia salina* и через водную суспензию бактерий). Предложен механизм «виртуальной» ловушки тепловых нейтронов на межфазных границах, проявляющийся в увеличении кажущегося сечения рассеяния нейтронов и триггерного увеличения нейтронного потока при сбросе межфазного градиента электрического потенциала. Обсуждается роль нейтронного излучения в тропосфере как своеобразного посредника в причинно-следственной цепочке астрогоеофизических событий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sigaeva E. A., Nechaev O. Yu., Panasyuk M. I. et al // Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin). 2009. T. 43. № 4. С. 649-653
2. Кужевский Б. М., Нечаев О. Ю., Сигаева Е. А. // Вестн. МГУ, Серия 3. Физика и Астрономия. 2002. № 1. С. 55-58.
3. Плотникова Н. В., Смирнов А. Н., Колесников М. В. и др. // Бюл. экспер. биологии и мед. 2007. Т. 143. № 4. С. 394-397
4. Masunaga S., Ono K., Sakurai I. et al // J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2001. v. 51. No. 3 P. 828-839.
5. Матвеева И. С., Смирнов А. Н., Воденников Б. Д. и др. // Бюл. экспер. биологии и мед. 2004. Т. 138. № 11 С. 530-534.
6. Плотникова Н. В., Фролова Е. Ю., Лапшин В. Б. и др. // Вестник РУДН. Серия «Медицина». 2008. № 6. С. 518-521.
7. Гончарук В. В., Лапшин В. Б., Плотникова Н. В. и др. // Доповіді НАНУ. 2010. N 9. С. 60-65.
8. Шихов С. Б., Шкурпелов А. А. Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. - М.: Атомиздат, 1972.
9. Зельдович Я. Б. Избранные труды. М.: Наука, 1985.
10. Серегин А. А. // ЖЭТФ. 1977. т. 73. С. 1634.
11. Лущиков В. И., Франк А. И. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 607.
12. Захаров А. А., Митюхляев В. А., Серебров А. П. // Патент РФ № 2144709 от 26.04.1998.

13. Васильев В. В., Вечтомова И. А., Орлов А. В., Шведов О. В. // Патент РФ № 2160938 от 15.03.1999.
14. Спивак П. Е. К проекту измерения времени жизни нейтрона. - М.: ЦНИИ ИАНТ, 1989.
15. Kolesnikov M. V., Matveeva I. S., Lapshin V. B. et al // *Oceanology*. 2005. V. 45. Suppl. 1. P. S102-S111.
16. Сыроешкин А. В. Попов П. И., Балышев А. В. и др. // *Хим. фарм. журнал*. 2004. Т. 38. № 11. С. 43-48.
17. Лесников Е. В., Гончарук В. В., Чистюнин В. Ф. и др. // Патент России № 2343453 от 10.01.2009.
18. Белишева Н. К., Кужевский Б. М., Сигаева Е. А. и др. // *ДАН*. 2006. Т. 407. № 5. С. 687-691.
19. Николаева Ю. Г., Николаев Г. М., Тимофеев К. Н. и др. // *Вестник РУДН*. 2007. №1 С.5-9.
20. Fedorov V. V., Lapin E. G., Semenikhin S. Yu. et al // *Appl. Phys*. 2002. A74. Suppl.1. P. 298 - 301.
21. Феттер К. Электрохимическая кинетика. - М.: Наука, 1961.
22. Mitchell P. // *Nature*. – 1961. – V.191. – P. 144-148.
23. Cherepanov D. A., Junge W., Mulkidjanian A. Y. // *Biophys. J*. 2004. V. 86. No. 2. P. 665-680.
24. Tikhonov A. N., Agafonov R. V., Grigor'ev I. A. et al // *Biochim. Biophys. Acta*. 2008. V. 1777. No. 3. P. 285-294.
25. Ledingham K. W., Spencer I. I., McCanny T. et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. - V. 84. No. 5. P. 899-902
26. Гончарук В. В., Самсоны – Тодоров А. О., Таранов В. В. и др. // *Электроника и связь*. 2010. Т. 2(55). С. 161-166.
27. Syroeshkin A. V., Popov P. I., Grebennikova T. V. et al // *J. Pharm. Biomed. Anal*. 2005. V. 37. No. 5. P. 927-930.
28. Липсон А. Г., Бардышев И. И., Кузнецов В. А. и др. // *ФТТ*. 1998. Т. 40. №3. С. 254-259.
29. Матвеева И. С., Плетенева Т. В., Березинская Т. Л. и др. // *Микроэлементы в медицине*. 2003. № 4. С. 15-21.
30. Гребенникова Т. В., Матвеева И. С., Мусиенко М. И. и др. // *Мол. ген., микробиол. и вирус*. 2006. № 1. С. 20-23.
31. Сыроешкин А. В., Буянова Н. И., Соколова С. Л. и др. // *Бюл. экспер. биологии и мед*. 2010. Т. 150. № 10. С. 414- 417.
32. Березинская Т. Л., Шлеева М. О., Капрельянц А. С. и др. // *Вестник РУДН*. 2004. № 4 (28). С. 262-267
33. Барышевский В. Г., Подгорецкий М. И. // *ЖЭТФ*. 1964. Т. 47. С. 1050.
34. Fedorov V. V., Voronin V. V. // *Nucl.Instr. Meth*. 2003. B201. No 1. P. 230-232
35. Несмеянов А. Н. Радиохимия. – М: Наука, 1978.
36. Antonenko N. V. // *Phys. Lett. B*. 1993. V. 319. P. 425.
37. Гречишкин В. В., Синявский Н. Я. // *УФН*. 1997. Т. 167. № 4. С. 413-427.
38. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия.- М.: Наука, 1975.
39. Andreev V. A. // *PSI 2002 annual report. R-97-05*. - 2002.
40. Поликанов С. М., Чултэм Д. // *УФН*. 1978. Т. 126. Вып. 3. С. 441-453.
41. Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S. et al / *Science*. V. 295. P. 1868-1873.

## Интерпретация и обработка ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит

Н. П. Данилкин, Н. Г. Котонаева

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: kongt@yandex.ru*

При проведении эксперимента по радиозондированию ионосферы с борта космической станции «МИР» в те периоды времени, когда станция находилась ниже максимума области  $F$  было обнаружено неизвестное ранее явление. Работа посвящена описанию наиболее общих свойств этого явления, а также других явлений, характерных для радиозондирования с ультранизких ИСЗ в терминах и понятиях «Руководства международного научного радиосоюза по интерпретации и обработке ионограмм», с тем, чтобы рассматривать и анализировать его в русле известных категорий и понятий упомянутого руководства.

Ключевые слова: орбитальный комплекс «Мир», радиозондирование ионосферы, ионограмма, задержанный нижний след

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Первый спутниковый ионозонд «Алуэрт 1» был выведен на орбиту Земли в 1962 г. Подготовка к этому эксперименту проводилась в те годы, когда информация о структуре и процессах в ионосфере на высотах больших максимума слоя  $F2$  ( $h_mF$ ) была весьма скудной и зачастую недостоверной. Так существовало мнение, что выше  $h_mF$  существует еще один относительно устойчивый слой с максимальной электронной плотностью существенно меньшей, чем критическая частота обыкновенной компоненты  $foF2$  в максимуме слоя  $F2$ . Поэтому решение о выборе высоты орбиты для искусственного спутника Земли (ИСЗ) Алуэрт в 1000 км было вполне естественным и на тот момент правильным. В дальнейшем была запущена целая серия ионозондов на орбиты вокруг Земли. При этом ИСЗ «Алуэрт 1», «ИСС-1,-2» (два японских спутника) имели полярные или близкие к ним орбиты высотой около 1000 км. «Космос 1809» и «ИСИС 2» летали на аналогичных орбитах с высотой 900 км и 1400 км соответственно. Орбиты спутников «Алуэрт 2», «ИСИС-1», «Интеркосмос 19» (в конце его существования) были эллиптическими: 500-3000 км, 570-3550 км, и 500-1000 км, соответственно. Однако ни один из известных авторов спутников никогда не опускался ниже высоты  $h_mF$ .

Однако в эксперименте на «Интеркосмос 19» было показано, что реализация идеи транзионосферного зондирования дает возможность получать информацию о процессах и структуре ионосферы вблизи максимума слоя  $F2$  на основе просвечивания ионосферы насквозь вблизи границы её радиопрозрачности [1,2]. Стало понятным, что информацию об основных параметрах области  $F2$  ( $foF2$  и  $h_mF$ ) можно получать, располагая ионозонд на любых высотах ионосферы, включая высоту её максимума плотности электронов. При этом можно было ожидать, что точность определения параметров ионосферы в максимуме или в его окрестностях окажется для этих очень «низколетящих» ИСЗ существенно выше. Напомним, что в современной литературе термин для ИСЗ «низкая земная орбита» (LEO) принят для высот меньших 1500 км. В настоящей работе термин «сверхнизкая орбита» относится к области высот ниже 400 км. Меньшая погрешность определения параметров

ионосферы для нашего случая связана с тем обстоятельством, что основная ошибка при определении высоты максимума ионосферы с высоты в 1000 км, ставшей к настоящему времени стандартной, связана с тем, что при вычислении  $Nh$ -профиля значимым является высотное распределение напряженности магнитного поля Земли. Существующие в настоящее время модели магнитного поля не дают необходимой точности. Чем больше диапазон высот, где необходимо их использовать, тем большая ошибка накапливается в процессе вычисления  $Nh$ -профиля ионосферы.

С точки зрения практического использования данных о структуре ионосферы для организации радиосвязи (в широком смысле слова, т.е. в том числе для радиолокации и т.п.) область вблизи максимума ионосферы имеет особое значение. Именно в этой области наиболее эффективно – так называемым «скользящим лучом» распространяются сигналы дальнего распространения в КВ-радиолокации, сигналы кругосветного распространения радиоволн, и именно на этих высотах должны отражаться сигналы радиосвязи при скачковом распространении радиоволн для наиболее эффективной работы. Для скачкового распространения эти частоты равны 85% от максимально применимой частоты (МПЧ) радиосвязи, и точка поворота луча лежит в малой окрестности ниже  $h_m F$ . Для всех этих случаев практического использования знаний об  $Nh$ -профиле ионосферы как можно более точная форма профиля в малой окрестности ниже максимума области  $F2$  имеет первостепенное значение. Между тем, именно здесь форма слоя  $F2$  наименее хорошо известна, так как в большинстве методов расчета  $Nh$ -профилей здесь заранее предполагается параболическое распределение электронной плотности, и экспериментальные данные подгоняются под это распределение. Расположение ионозонда на высотах в малой окрестности ниже  $h_m F$  позволяло ожидать, с одной стороны, более точное определение формы  $Nh$ -профиля в этой важной области высот, т.к. не нужно было использовать неточную модель магнитного поля Земли на протяжении многих сотен километров (обычно – 600 – 700 км). С другой стороны, основные идеи трансionoсферного радиозондирования обещали возможность определения основных параметров ионосферы с дополнительных к основным и новых точек зрения, в том числе, определение формы ионосферных неоднородностей и решении такого важного вопроса – как существование отрицательных долин между слоями  $F1$  и  $F2$  [3].

Расположение ионозонда на космической станции (КС) «МИР», летавшей на высотах 340 – 400 км, должно было ответить на эти ожидания. Зондирования с этих высот в дальнейшем будем называть внутренним. Математическое моделирование эксперимента показало [4,5], что указанная выше область высот может быть особенно тщательно изучена с КС «Мир», так как она попадает в диапазон высот между расположением станции и высотой максимума области  $F$ . На рис. 1 показано математическое моделирование эксперимента из работы [4]. Большое количество диагностирующих среду лучей проходит при этом именно в интересующей нас области, как хорошо видно на рис. 1.

Эксперимент на КС «МИР» дал ожидаемые результаты:

- при всех положениях станции относительно  $h_m F$  (сверху, снизу или в самом максимуме) были получены сведения относительно основных ионосферных параметров с существенно меньшей погрешностью, чем при зондировании с высоты 1000 км. Фактически для случаев, когда на ионограмме видны только два следа «отсечки» « $o$ » и « $x$ »-лучей, что означает положение ИСЗ строго в максимуме ионосферы, погрешность определения высоты  $h_m F$  равна погрешности определения высоты ИСЗ. Для КС «МИР» эта погрешность равна 10 метрам. Отметим, что аналогичная ситуация существует и для определения электронной плотности на высоте ИСЗ по частоте отсечки « $o$ »-луча. В случае, когда станция не находилась строго в максимуме слоя  $F2$ , с такой погрешностью определялась начальная точка  $Nh$ -профиля. Весь профиль на весьма ограниченном участке высот между ИСЗ и максимумом ионосферы (не более 200 км), также



вычисляется более точно, т.к. естественная ошибка, которая обязательно возникает на каждом шаге вычислений, не успевает вырасти до значительных величин.

- хорошо известно, что существует большая проблема определения высоты максимума ионосферы ночью. Это связано с тем, что начальная точка (действующая высота на минимальной частоте отражения от ионосферы) при расчете  $Nh$ -профиля ставится весьма неопределенно и эта неопределенность переносится на измерение  $h_m F$ . Измерения на КС «МИР» дали возможность проверить эту точность вычисления в реальных условиях. Проверка показала, что даже наиболее совершенные наземные ионозонды (использовались измерения в Чилтоне, Великобритания [6], в Ростове-на-Дону и на станции Чунгли (Chung-Li) [7]) дают ошибку при определении высоты максимума слоя  $F$  в 20 – 50 – 70 км в зависимости от поглощения радиоволн на низкочастотном конце отражений от области  $F$ . Постоянно существующий на сверхнизкой орбите ионозонд мог бы корректировать ночные измерения  $h_m F$  для всех ионосферных станций планеты.

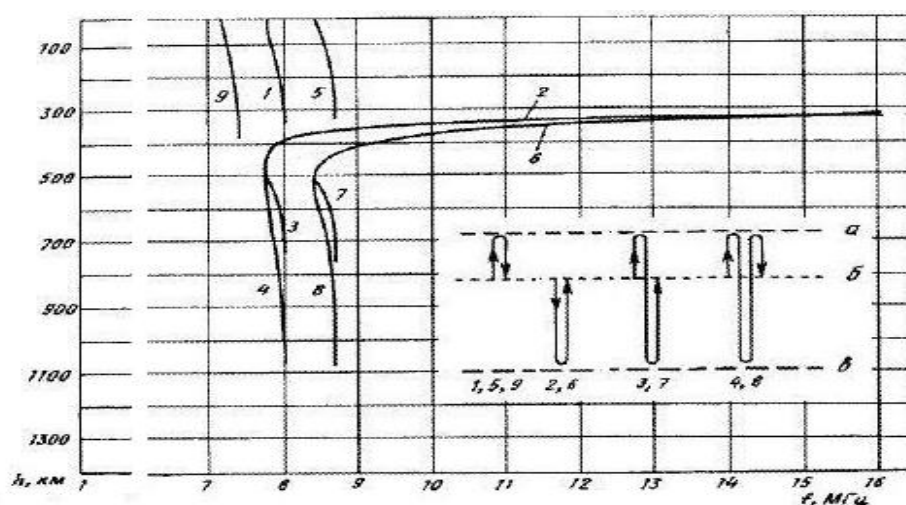


Рис. 1. Спутниковая синтезированная ионограмма вертикального радиозондирования ионосферы [5] для случая: высота орбиты ионозонда 312 км, высота  $h_m F$  – 352 км, плазменная частота на высоте ионозонда – 7.74 МГц, плазменная частота для  $h_m F$  – 8.04 МГц; На вставке внизу и справа показаны уровни: а - отражение от ионосферы, б - высота ионозонда, в - поверхность Земли. На ионограмме отмечены те лучи, которые показаны на вставке (1,2,3,4 – о компонента, 5,6,7,8 –  $x$  и  $9-z$ -компоненты).

Однако одновременно с ожидаемыми результатами эксперимент на КС «МИР» дал совершенно неожиданный для его авторов результат. Этот результат продемонстрирован на рис. 2 на двух ионограммах – справа и слева. Ионограммы внизу – копии верхних ионограмм. На них сплошной линией выделены те части ионограмм, на которые авторы хотят обратить внимание читателей.

Слева – на первый взгляд, ионограмма может быть проинтерпретирована на основе схемы распространения зондирующих сигналов как на рис. 1 (траектории 3, 7), т.к. наибольшая частота отражения от ионосферы и наибольшая частота нижнего следа одинаковы. Однако, при более точных расчетах действующая дальность, зафиксированная на нижнем следе меньше суммы действующих расстояний при отражении от ионосферы и от Земли. Справа, на ионограмме отчетливо видно, что новый след не заканчивается на частоте  $foF2$  или критической частоте необыкновенной компоненты  $fxF2$ , но продолжается существенно дальше (до 15 МГц) вопреки тому, что ожидалось в соответствии с рис. 1. След отражения от Земли на своем низкочастотном конце как бы поворачивается почти на 180 градусов и продолжается в сторону увеличения частот. В

большинстве случаев, этот «нижний» след продолжается до частот значительно больших, чем частота  $foF2$ , и его групповые задержки существенно больше, чем задержки при отражении от Земли, что хорошо видно на нижнем фрагменте рисунка. Этот след нового явления на ионограммах получил название – задержанный нижний след (ЗНС).

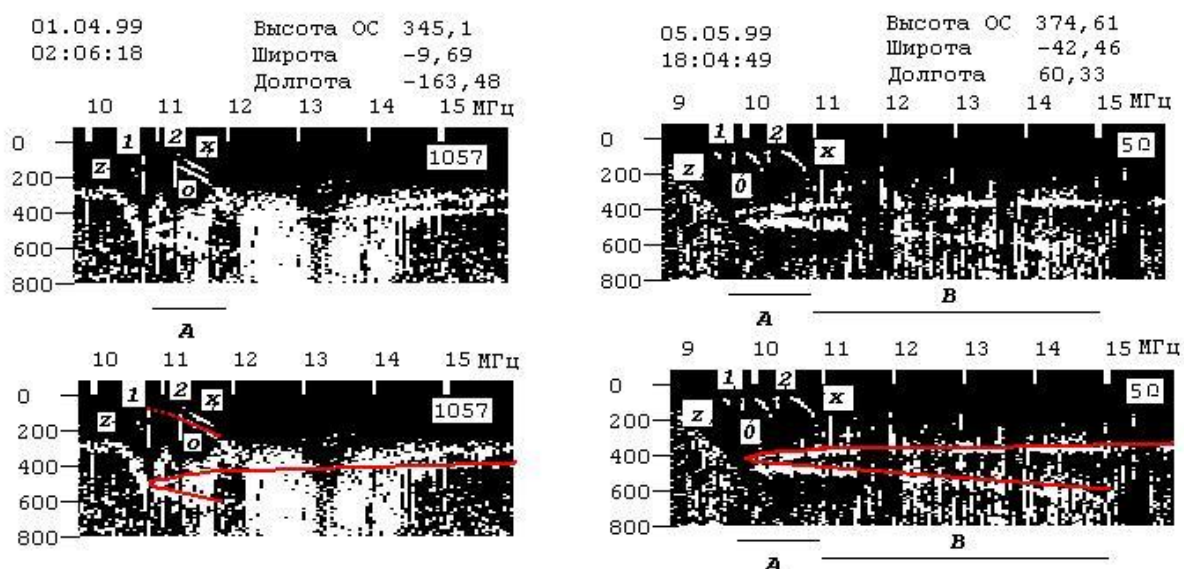


Рис. 2. Две ионограммы, иллюстрирующие принципиально новый результат зондирования со сверхнизких орбит. Каждая ионограмма показана в двух видах: сверху – ионограмма без изменений со стороны оператора, внизу – та же ионограмма, но непрерывной линией выделен след, на который авторы обращают внимание читателя. Слева – ионограмма может быть проинтерпретирована на основе схемы распространения зондирующих сигналов как на рис. 1, т.к. наибольшая частота отражения от ионосферы и наибольшая частота нижнего следа одинаковы. Справа, нижний след простирается до 15 МГц, т.е. много дальше чем наибольшая частота о-следа (~ 10.3МГц) и этот след не может быть распространением по пути 3 или 4.

Следует отметить, что ионограммы с ЗНС являют собой принципиально новую (дополнительную к известной) картину радиозондирования ионосферы. Общие принципы радиозондирования с детальной проработкой интерпретации и обработки ионограмм описаны в международном руководстве по радиозондированию ионосферы. Интерпретация ионограмм с ЗНС должна подчиняться всем тем правилам, которые были разработаны международным коллективом геофизиков. В частности, в Руководстве рекомендовано, что «особое внимание при интерпретации ионограмм должно быть обращено на то, чтобы принятые на какой-либо станции местные, «домашние» правила не противоречили разработанным принципам». Поэтому одни из первых публикаций [8] с описанием ЗНС-ионограмм мы направили в Бюллетень ИНАГ (INAG - Ionosonde Network Advisory Group). Именно эта группа ученых (ранее она называлась «Консультативной Группой по мировой сети ионосферных станций при Международном научном радиосоюзе, URSI) подготовила и опубликовала два издания Руководства по интерпретации и обработке ионограмм [9]. При этом состоялось всестороннее обсуждение новых ионограмм и председатель ИНАГ д-р Вилкинсон - одновременно он является председателем комиссии «Ионосфера и распространение радиоволн» международного научного радиосоюза (URSI), где ИНАГ является рабочей группой №1 - предложил для характеристики нового типа отражений на ионограмме термин - задержанный нижний след. В английской транскрипции - RLT (Retarded Lower Trace).

В настоящей работе суммированы принципы обработки и интерпретации ионограмм с ЗНС со строгим контролем их соответствия международному руководству по

интерпретации и обработке наземных ионограмм и ионограмм внешнего зондирования [9,10]. Впервые приведено полное перечисление всех ионограмм КС «МИР», рассмотрены морфологические особенности ионограмм со сверхнизких орбит (как выше, так и ниже  $h_m F$ ) и дано феноменологическое описание новых ионограмм.

В дальнейшем предполагается передать весь банк ионограмм КС «МИР» в международный банк данных. Настоящая статья предлагает на обсуждение те принципы интерпретации и обработки спутниковых ионограмм со сверхнизких орбит, которые – по мнению авторов – должны быть при этом использованы.

## 2. ПРИНЦИПЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ОБРАБОТКИ НОВЫХ ИОНОГРАММ

Обработка ионограмм радиозондирования ионосферы происходит на основе [9] «следующих четырех целей, согласно которым необходимо измерять те или иные параметры ионосферы:

- а) дать феноменологическое описание ионограммы,
- б) дать упрощенное описание ионосферы над или под ионозондом,
- в) определить профиль электронной концентрации по высоте,
- г) опознать и измерить параметры, которые определяют и описывают физические характеристики ионосферы».

Исторически разработка вопросов по истолкованию ионограмм проводилась, главным образом, из необходимости описания ионограммы в целом, поэтому феноменологическое описание является первым шагом интерпретации ионограмм.

### 2.1. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИОНОГРАММ СО СВЕРХНИЗКИХ ОРБИТ

Ионосферные исследования на КС «МИР» были начаты 12 августа 1998 года и закончены 25 июня 1999 г. Ионограммы были получены на Земле по двум каналам – по радиоканалу и были возвращены на Землю непосредственно в магнитной записи. Ионограммы по радиоканалу были получены на ряде ионосферных станций (Москва, Ростов-на Дону, Чунг-Ли и др.) и, в основном, были использованы для юстировки антенн и экспериментальному подбору параметров зондирования. Часть полученных по радиоканалу результатов была сразу опубликована [7]. Полный перечень ионограмм в магнитной записи приведен в табл. №1.

В магнитной записи было зарегистрировано 9217 ионограмм. Ниже приведены все времена, выделенные для ионосферных наблюдений в 1999 году (все они дали результаты), все полученные ионограммы, а также некоторые другие навигационные детали.

Ионограммы были получены в сложных условиях:

- в рабочем положении станция, как правило, вращалась. Поэтому антенны ионозонда редко находились в оптимальном для радиозондирования положении;
- в электромагнитном смысле станция была очень «грязной» - на ионограммах зафиксировано множество лишних электромагнитных сигналов, которые не относятся к результатам радиозондирования, а также не являются той или иной характеристикой ионосферной плазмы.

Антенны ионозонда на внешней поверхности станции находились в окружении большого числа технологических деталей, имеющих размеры сравнимые с антенной и являющихся пассивными отражателями радиоволн ионозонда. На рис. 3 показано фото антенны ионозонда на внешней поверхности блока ПРИРОДА перед выдвижением лучей антенны.

Таблица 1

	Дата	Количество ионограмм	Время, московское декретное	Витки	Кадры	Высота, км	Особенно интересные события
1	10.02.-	460	13:29:58	2147	1-460	355.79	
	11.02		16:15:29	2164		350.12	
2	16.02.-	618	10:24:28	2239	1-618	361.13	
	17.02		14:16:11	2257		347.75	
4	02.03.-	320	7:15:03	2457	1-320	363.89	
	3.03		10:11:34	2474		370.56	
5	10.03	1521	2:26:11	2579	1-1521	363.58	
	11.03		3:38:52	2596		352.5	
6	31.03-01.04	1892	12:49:46	2917	1-1892	360.28	ЗНС, пузыри
			12:49:46	2932		358.2	
7	20.04	272	11:18:29- 14:23:16	3231-3233	1-272	348.99-348.91	
8	21.04	798	00:26:34- 13:09:00	3240-3248	1-798	336,13-348,17	ЗНС,
9	22.04	290	11:47:27- 23:50:57	3263-3271	1-290	342.91-339.34	ЗНС,
10	23.04	677	01:13:50- 12:20:36	3272-3279	1-677	334.95-346.79	
11	5.05	177	17:57:59- 19:44:15	3487-3488	1-177	379.83-364.14	ЗНС,
12	6.05	639	03:17:48- 18:35:13	3478-3488	1-639	355.47-356.03	ЗНС,
13	7.05	649	02:07:33- 07:06:37	3493-3496	1-649	354.42-356.79	
14	2.06	310	16:11:49- 19:36:41	3911-3913	1-310	359.20-351.23	ЗНС,
15	3.06	292	15:09:04- 18:25:56	3926-3928	1-292	358.91-354.23	
16	17.06	9	13:15:48- 13:19:32	145	01.сен	359.38-357.57	z-следы
17	24.06	285	08:13:03- 11:36:43	252-254	1-285	357.07-354.61	
18	25.06	8	05:28:53- 05:29:41	266	01.авг	354.47-354.82	

На фото (рис. 3) лучи находятся в свернутом состоянии внутри кожухов антенны. Они могут быть выдвинуты (а также убраны обратно) по команде космонавта на любую длину от 0 до 25 метров. Он определялся таким образом, чтобы – с одной стороны – не повредить другим измерениям на станции (блики в оптические приборы и т.п.), а – с другой стороны – достаточно эффективно работать в качестве единственного диполя антенны ионозонда. Напомним, что в более ранних отечественных экспериментах использовались два скрещенных диполя для верхних и нижних частот диапазона станции. Большим неудобством явилась необходимость выдвижения лучей антенны на разную длину. Проведенные антенные расчеты, тем не менее, подтвердили возможность работы антенны в данных условиях. Последующая юстировка антенны заключалась в выдвижении одного плеча антенны и подбора его длины. Второе плечо могло быть выдвинуто только на 8 метров (ни больше, ни меньше). Подбор длины первого плеча – с одновременной регистрацией ионограмм – в конечном итоге привела к антенне, которая изображена на рис. 4. На этом рисунке приведена также схема расположения всех блоков станции «МИР» последнего набора (станция существовала более 10 лет и количество блоков менялось) с указанием их размеров.

Антенная система Ионозонда представляла собой диполь с лучами разной длины (18 м и 8 м) и углом между ними в 110 градусов. Видно, что не только детали внешней поверхности блока Природа, но и детали и сами поверхности других блоков также имели размеры сравнимые с размерами антенны, т.е. также были пассивными элементами антенны ионозонда.

Указанное выше является причинами того, что ионограммы сильно загрязнены лишними сигналами и в ряде случаев отсутствуют вследствие «плохого» расположения антенн ионозонда. Мы различаем хорошее и плохое расположение антенн ионозонда. Под «хорошим» расположением антенн ионозонда мы понимаем такое расположение антенн внутри ионосферных слоев, при котором обеспечивается значительное количество эхосигналов вертикального распространения. Плохое расположение – это или отсутствие сигналов вообще или большинство эхо сигналов есть наклонное отражение от ионосферы. В [9] описана практика отличия вертикальных и наклонных отражений.

Хорошо известно, что «на ионограмме содержится огромное количество сведений об условиях в ионосфере, но они находятся в такой форме, что пользоваться ими непосредственно для многих важных исследований либо невозможно, либо очень неудобно» [9]. Поэтому для наземных и спутниковых ионограмм отобраны «те характеристики ионосферы, которые особенно важны для научных и практических целей» и разработаны методы «определения характеристик по ионограммам».



Рис. 3. Основание антенны ионозонда на внешней поверхности блока ПРИРОДА перед выдвижением и в окружении большого количества разнообразных технологических деталей блока, которые в этих условиях служат пассивными переизлучающими элементами антенны.

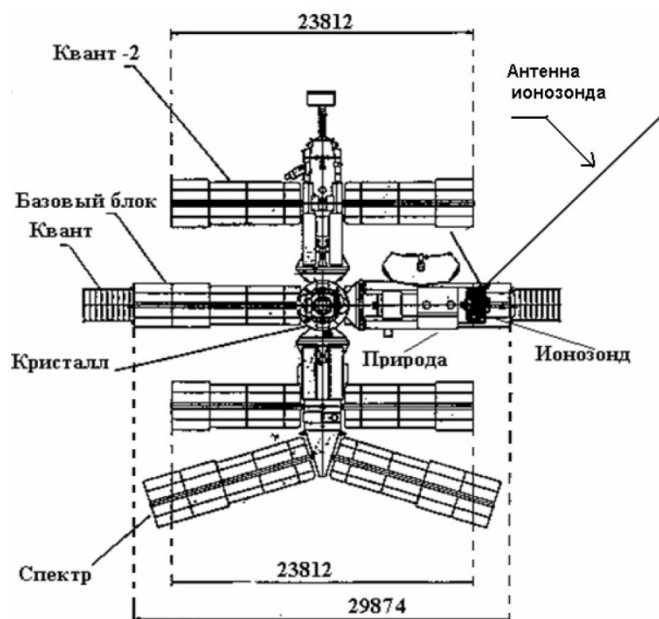


Рис. 4. Схематическое изображение орбитальной пилотируемой космической станции «МИР» с указанием размеров отдельных блоков станции.

Ионозонд расположен в блоке «Природа».

На схеме показана антенная система Ионозонда с приблизительным соблюдением размеров и угла раскрытия антенны.

#### СЛЕДЫ ОТРАЖЕНИЙ

На рис. 1 и 2 приведены модельная и реальные ионограммы радиозондирования с высот ниже максимума ионосферы с основными следами отражений на них. Эти следы делятся на несколько групп.

Во-первых, это следы отражения от ионосферы. Их оставляют радиоволны, которые распространяются от ИСЗ вверх видами «z», «o» и «x» и, отражаясь от внутренней ионосферы, возвращаются на спутник. Это распространение происходит в частотном диапазоне между частотами отсечки всех трех компонент магниторасщепленного сигнала и соответствующими критическими частотами ионосферы. Следы обыкновенной и необыкновенной компоненты магниторасщепленной волны являются одинаково законченными, несут информацию об ионосфере на интервале от высоты ИСЗ до высоты  $h_m F$ . Эти следы являются зависимостями действующей высоты от частоты  $h'_o(f)$  и  $h'_x(f)$ . Методы расчета по ним  $Nh$ -профиля аналогичны подобным расчетам при внешнем зондировании. Поэтому при анализе чаще использовался след обыкновенной волны, для которого используются более простые соотношения. Поведение следа «z»-волны ( $h'_z(f)$ ) отличается от случая зондирования с высот порядка 1000 км. Расчеты показали, что в том случае, если ионозонд находится на высотах менее 100 км ниже высоты  $h_m F$  «z» - компонента так же как и «x» и «o» -компоненты достигает максимума ионосферы и от него отражается, то есть достигает своей критической частоты  $f_z F2$ , значение которой легко определяется из соотношения (1), приведенного ниже. Такое поведение «z» волны до эксперимента на КС «МИР» не наблюдалось никогда. Напомним, что при внешнем зондировании с высот более 500 км «z» волна не возбуждается ниже частоты  $f_z I$  [9], так как на частоте  $f_z I$  функция коэффициента преломления имеет разрыв второго рода, причем значения коэффициента преломления неограниченно возрастают в малой окрестности  $f_z I$ , это обуславливает тот факт, что запаздывание сигнала становится бесконечным для вертикального распространения. Эта частота в эксперименте на КС

«Мир» не наблюдалась. В некоторых случаях «z» - компонента обрывалась, видимо, вследствие сильного поглощения.

Во-вторых, одновременно на частотах от плазменной частоты на высоте ИСЗ до максимальной частоты диапазона происходит распространение радиоволн вниз к Земле, отражение от нее и возвращение обратно на спутник, от этих радиоволн на ионограмме появляется след отражения от Земли для «o» и «x» компонент.

В-третьих, на некоторых ионограммах появляется ЗНС, который по предположению авторов является результатом наклонного распространения радиолуча, отражением его от Земли и последующим отражением (либо преломлением) от горизонтальных неоднородностей ионосферы.

В табл. 2 приведены основные частотные характеристики ионосферы, которые определяются по ионограммам спутникового радиозондирования, как для случая внешнего радиозондирования, так и для внутреннего спутникового зондирования ниже высоты максимума. В нижних строках добавлены две новые характеристики, которые можно определять по следам с ЗНС.

Таблица 2

Название	Обозначение	Наблюдаются при зондировании с высот 1000 км	Наблюдались на ПКК МИР на высотах 340-390 км	Примечания
$f_oF2, f_xF2$	Критические частоты o- и x- волн в ионосфере	+	+	
$f_zF2$	Критическая частота для z-волны	-	+	Не наблюдалась в экспериментах с внешним зондированием
$f_N$	Плазменная частота резонансного пика на высоте спутника (вблизи спутника)	+	+	
$f_H$	Гирочастота на высоте спутника	+	-	$f_N$ больше $f_H$
$f_oS, f_xS, f_zS$	Нижние частоты отсечки o-, x-, z- волн на высоте спутника	+	+	
$f_zI$	Верхняя частота отсечки на высоте спутника	+	-	На ПКК «МИР» не наблюдалась
$f_T$	Верхняя гибридная частота на высоте спутника	+	-	На ПКК «МИР» не наблюдалась
$f_E$	Наименьшая частота отражения o-волн от Земли или точка поворота следа ЗНС	+	+	
$\Delta_H$	Глубина следа ЗНС на его наибольшей частоте	-	+	Характеризует контрастность неоднородности
$f_oF2 \leq f_E$	Совпадение (несовпадение) критической частоты слоя F2 с наименьшей частотой отражения от Земли			Характеризует положение ИСЗ относительно высоты максимума плотности электронов слоя F2
		+	-	(+) выше, (-) ниже

Следует отметить, что так называемой частоты  $f_zI$  [4] – верхняя частота отсечки z-волны на высоте спутника, где запаздывание становится бесконечным для вертикального распространения и которая является наибольшей частотой распространения z-волны для случая внешнего зондирования - в эксперименте на станции МИР не наблюдалось.

Частота отраженной  $z$ -волны увеличивалась либо до критической частоты  $z$ -компоненты, что легко определялось из соотношения (1), смотри ниже, либо обрывалась, видимо, вследствие сильного поглощения. Значительного увеличения действующего диапазона, что является характерной особенностью распространения  $z$ -компоненты при внешнем зондировании с высоты 1000 км, при этом в эксперименте на станции МИР не наблюдалось никогда.

#### РЕЗОНАНСНЫЕ ПИКИ

Из табл. 2 видно, что практически все параметры, которые определяются по данным внешнего зондирования с высоты 1000 км можно определять и со сверхнизких орбит. Исключением являются некоторые резонансные пики, находящиеся в области частот меньших плазменной частоты вблизи спутника. Например, гирочастота на высоте спутника или верхняя гибридная частота на высоте спутника. Однако, несмотря на то, что они не могут быть отсчитаны с ионограммы непосредственно, они могут быть вычислены из измерений  $foS$ ,  $fxS$ ,  $fzS$  по известным [9] соотношениям:

$$f_H = \frac{f_N^2 - f_x^2 S}{f_x S} = \frac{f_N^2 - f_z^2 S}{f_z S} \quad (1)$$

$$f_T = \sqrt{f_N^2 + f_H^2} \quad (2)$$

Отметим также, что величины  $f_N$ ,  $foS$ , а при нахождении спутника ниже  $h_m F$  и  $f_E$ , численно одинаковы, что удобно для взаимных проверок, но происходят от разных явлений. Введенный новый параметр  $\Delta_N$  характеризует свойства той неоднородности (контрастность, форму и скорость нарастания электронной плотности внутри неоднородности), которая обеспечивает поворот большого числа радиолучей в сторону ИСЗ.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что все важные характеристики ионосферы, которые рекомендованы международным руководством по интерпретации и обработке ионограмм, при внутреннем зондировании могут быть получены. При этом, отметим, что погрешности в определении этих данных – как было показано – ниже. Отметим также, что если можно говорить о сравнительной «ценности» измерений в различных высотных диапазонах ионосферы, то ценность высокоточных экспериментальных данных вблизи и слегка ниже высоты максимума – на взгляд авторов – представляется более значительной.

#### АППАРАТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИОНОЗОНДА ОТНОСИТЕЛЬНО МАКСИМУМА ИОНОСФЕРЫ

В большинстве случаев регистрации «нормальных» ионограмм, т.е. таких, которые можно интерпретировать с регистрацией большинства параметров, ионозонд в эксперименте на КС «Мир» находился выше максимума концентрации ионосферы. Вопрос определения расположения ионозонда относительно максимума ионосферы является для радиозондирования с КС «Мир» вопросом весьма существенным. Высота максимума ионосферы есть параметр исключительной важности и его определение наземными установками достаточно сложно. Он надежно решается только в ракетных измерениях или в модифицированных ионозондах наземного радиозондирования, в которых используются не только групповые задержки сигналов. Поэтому достоверное аппаратное определение относительного положения ионозонда к положению максимума



ионосферы, а также последующее более точное определение высоты этого максимума есть достоинство метода.

Рассмотрим принципы ионограммного определения расположения ионозонда относительно максимума.

На рис. 5 рассмотрены три положения ионозонда относительно максимума: выше максимума (а), в максимуме (б) и ниже максимума (в). Если ионозонд находится выше максимума ионосферы то радиоволны диапазона частот между плазменной частотой на высоте спутника –  $f_s(a)$  и  $foF2$  распространяются вниз от ИСЗ отражаются от высот больших  $h_mF$  и возвращаются вверх на спутник. Ионограмма – в этом случае – есть классическая ионограмма внешнего зондирования с сильно сокращенным следом отражения от внешней ионосферы. Ее схематическое изображение приведено справа на рисунке 5а. При этом  $foF2$ , определенная по отражению от ионосферы, и  $foF2$ , определенная по наименьшей частоте отражения от Земли, должны быть одинаковыми и – при хороших ионограммах – должны выходить на одну и ту же вертикальную линию для обоих магниторасщепленных лучей радиозондирования. В положении «ниже» максимума радиоволны диапазона между  $f_s(v)$  и  $foF2$  распространяются от ИСЗ вверх, но на ионограмме их следы находятся в том же месте, что и в предыдущем случае. Однако минимальная частота отражения от Земли и  $foF2$  в этом случае не совпадают, как это хорошо видно на нижней ионограмме справа рис. 5(в). Именно это несовпадение частот является наиболее ярким и легко отличимым свидетельством нахождения ИСЗ ниже максимума ионосферы. На этой же ионограмме приведен характерный след с ЗНС для обыкновенного и необыкновенного лучей. След необыкновенного луча показан прерывистой линией, тем самым показано, что уверенного свидетельства именно о таком ходе необыкновенного луча авторы не имеют. Как правило, необыкновенные лучи в ЗНС следах были очень слабыми или отсутствовали совсем. Во многих случаях ЗНС следы были ограничены диапазоном высот, который мог регистрировать ионозонд. Создавалось впечатление, что они могли бы продолжаться и дальше. След ЗНС появлялся не на всех ионограммах с высот ниже  $h_mF$ . В положении ИСЗ в максимуме на частоте  $foF2$  от ионосферы могут отражаться только радиоволны частоты  $foF2$  и след отражения от ионосферы становится вертикальным рис. 5(б). В таких уникальных случаях погрешность определения высоты максимума сравнима с погрешностью определения высоты ИСЗ [6].

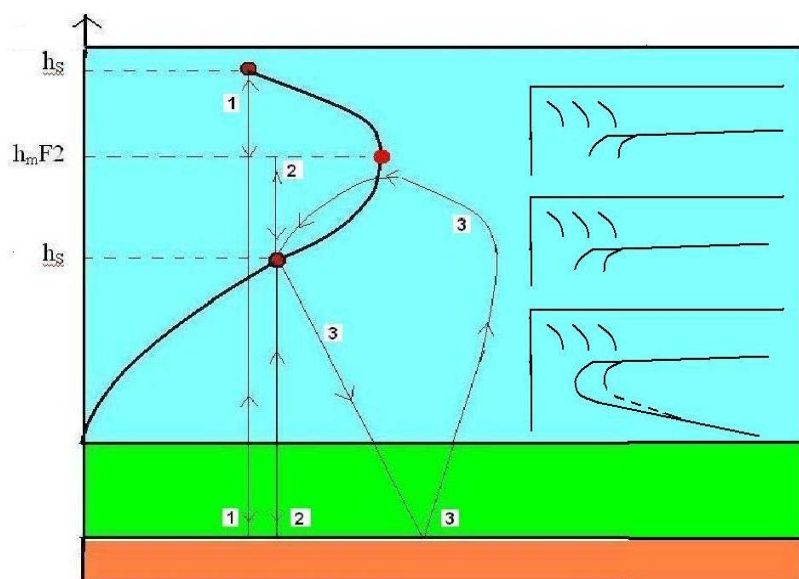


Рис. 5. Схематическое изображение радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит. Отмечено красными кружками два положения ИСЗ – выше максимума ионосферы (1) и ниже (2). В обоих случаях показан путь лучей зондирования. Справа схематически представлены три ионограммы: ИСЗ выше максимума, ниже, ниже и виден след ЗНС.

## ТЕРМИНОЛОГИЯ

В отличие от радиозондирования с высот 1000 км, когда [9] рекомендует различать только термины «действующая глубина» и «действующий диапазон» для отличия вертикального распространения от наклонного распространения сигналов, для случая расположения станции ниже  $h_m F$  необходимо использование терминов «действующая высота», «действующая глубина» и «действующий диапазон».

### ПРОБЛЕМА «ПЕРЕКРЫТИЯ»

Иногда и в настоящее время возникают сомнения в том, что регистрация высоты максимума ионосферы при зондировании с ИСЗ и с самой Земли показывает разные значения. Возникает проблема, получившая название проблема «перекрытия», при которой высота максимума, определенная с ИСЗ оказывается меньше той, которая измеряется наземным ионозондом. Этот вопрос для радиозондирования с КС «МИР» исследовался особенно тщательно [6,7]. Результат – проблемы «перекрытия» для зондирования с КС «МИР», также как и для зондирования с высот 1000 км не существует и результаты зондирования с Земли и с КС «МИР» могут быть использованы одновременно в расчетах.

## 2.2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИОНОГРАММ С ЗНС

### 2.2.1 НЕПРЕРЫВНОСТЬ СЛЕДА ЗНС

Главная, бросающаяся в глаза морфологическая особенность ЗНС следа есть его монотонная непрерывность вдоль оси частот. При этом наблюдается всегда практически линейная зависимость действующей дальности от частоты. Отсутствуют какие-либо перегибы на кривых ЗНС. От ионограммы к ионограмме может изменяться угол наклона к оси частот, но это всегда – в пределах погрешности измерений, которые были на КС «МИР» – просто прямая линия. На отдельных ионограммах – как это, например, видно на рис. 2 – ЗНС имеет разрывы по частоте. Однако анализ большого числа ионограмм с ЗНС показал, что разрывы встречаются в разных местах ионограмм и хорошо коррелируют с разрывами в частотном ходе вертикального отражения от Земли. Они не имеют видимых закономерностей и – с большой вероятностью можно утверждать – являются следствием технических причин, которые не связаны с разворотом луча внутри неоднородности и происходящей вследствие этого его монотонной непрерывности. Для авторов является несомненной гипотеза о том, что причиной возникновения следа ЗНС служит отражение или преломление зондирующих лучей в сферически неоднородной ионосфере. Однако строение этой неоднородности может быть различно. Рассмотрим две гипотезы: гипотеза 1: макронеоднородность есть система отдельных неоднородностей ионосферы замкнутой формы, напоминающая отдельные облака в тропосфере Земли и гипотеза 2: макронеоднородность есть система вложенных друг в друга неоднородностей замкнутой формы с постоянно увеличивающейся электронной концентрацией (смотри рис. 6).

Такая особенность ЗНС, как монотонная непрерывность, видимо, является доказательством того факта, что внутреннее устройство неоднородности скорее удовлетворяет гипотезе 2, так как в случае гипотезы 1 обязательно наблюдались бы разрывы и изгибы в следах ЗНС по аналогии, например, с разрывами кривых действующих высот между слоями E, F1 и F2 при наземном зондировании.

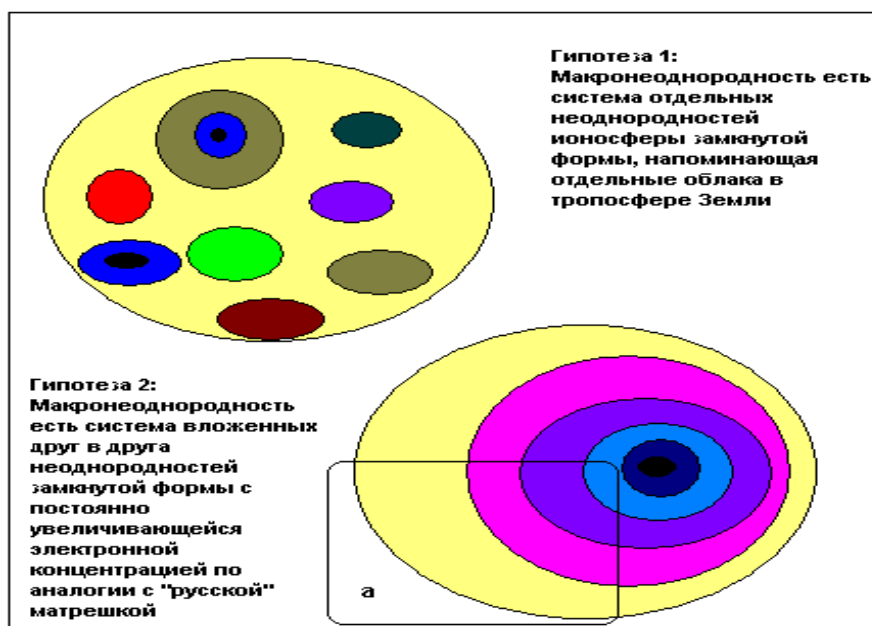


Рис. 6. Две гипотезы внутреннего строения макронеоднородности.

При выборе между двумя гипотезами внутреннего строения макронеоднородности, следует также отчетливо понимать, что ионограммы с ЗНС доказывают только существование горизонтального градиента с постоянно увеличивающейся электронной плотностью только в том пространстве ионосферы, которое пронизывают исследующие ионосферу лучи с постоянно увеличивающейся частотой. Только в этом пространстве последующее трассирование радиолучей может быть использовано для определения параметров горизонтального градиента. Гипотезу о замкнутости поверхности макронеоднородности мы делаем только на основе нескольких найденных сопоставлений явления ЗНС с «дисками Калинина» [11]. Эта гипотеза постулирует замкнутость пространства диска размерами около 1000 км. Привлекательная – по нашему мнению – гипотеза Калинина [11], в настоящее время, тем не менее, не является полностью принятой.

Второй также очень характерной особенностью следа ЗНС является непрерывность перехода от  $f_E$  к самому ЗНС. Ни на одной ЗНС ионограмме не было замечено разрывов, которые характерны для разрывов в действующих высотах или глубинах, возникающих при радиозондировании на долинах или хотя бы на резких перегибах в монотонном нарастании (или убывании) электронной плотности. Это означает, что кратные сигналы 3, 7 из рис. 1, а также двукратные 4 и 8, если и возникают в следе ЗНС, то только в крайне ограниченной полосе частот. В целом же весь ЗНС правильнее – с нашей точки зрения – считать следствием наклонного распространения и возвращения на ИСЗ радиоволн, происходящего вследствие влияния неоднородности.

#### ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ СЛЕДА ЗНС

Интригующей особенностью ионограмм с ЗНС является их длительность непрерывного существования на последовательности ионограмм. При этом конкретные параметры ионосферы, определяемые по этим ионограммам, могут изменяться в весьма значительных пределах, но на всех ионограммах факт ЗНС со всеми характерными описанными выше деталями существует. На рис. 7 показана проекция траектории движения КС «МИР» на поверхность Земли и выделен район существования ЗНС на

ионограммах, здесь же приведены две реальные ионограммы в начале (кадр 571) и в конце (кадр 602) периода времени существования ЗНС.

В рассматриваемом сеансе ЗНС следы были зафиксированы на 37 ионограммах в непрерывном (8-секундном) режиме. За это время станция прошла около  $2,5 \cdot 10^3$  километров. Параметры ионосферы в начале и в конце этого длительного сеанса резко отличались. Весь этот период КС «МИР» находилась ниже высоты  $h_m F$  со значительной разницей по частоте между  $foF2$  и  $foS$

На рис. 7 также следует обратить внимание на след «z» - компоненты, которая достигает своего критического значения и видна лучше, чем «o» -компонента и «x» -компонента и может служить основанием для расчета Nh-профиля. В этом конкретном примере хорошо видно, что, если o- и x-следы мало пригодны для расчета профиля плазмы вблизи спутника, то z-компонента есть равноправная им замена.

В табл. 3 приведены в сокращенном виде для отдельных фаз рассматриваемого сеанса диагностики явления ЗНС его основные характерные параметры. Использованы обозначения табл. 2. Географические широты и долготы обозначены как  $\varphi$  и  $\lambda$ .

Из табл. 3 и рис. 7 хорошо видно, что ЗНС наблюдается на протяжении более 2000 км в ионосфере с резко отличными параметрами. Так плазменная частота на высоте ИСЗ (наиболее точно определяемый параметр) уменьшилась на  $\sim 30\%$ , критическая частота немногим меньше. Но резкий горизонтальный градиент электронной концентрации, обеспечивающий разворот всех лучей в противоположную сторону продолжал существовать.

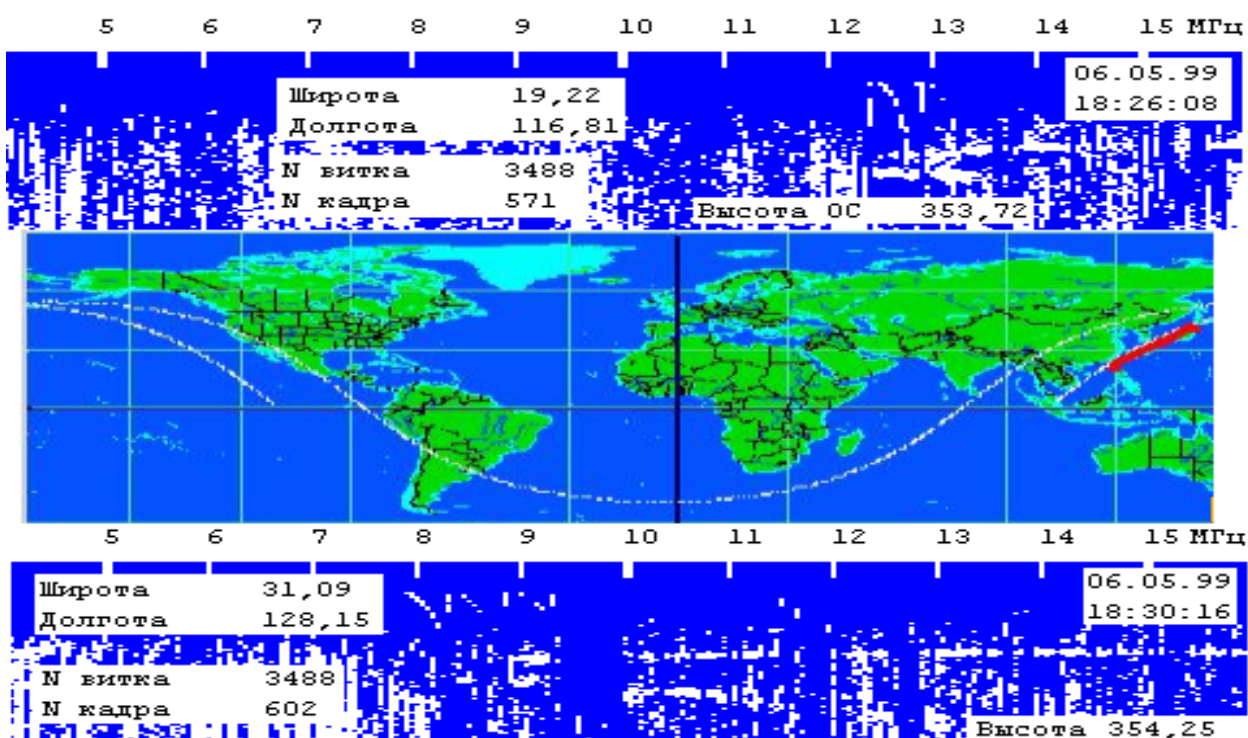


Рис. 7. Демонстрируется длительность существования явления ЗНС.

На верхнем фрагменте показана ЗНС-ионограмма со всеми характерными деталями ЗНС: значительной разницей по частоте между  $foF2$  и  $foS$ , хорошо различимым ЗНС-следом.

На среднем – проекция траектории станции на поверхность Земли с выделенным участком траектории, где наблюдался ЗНС.

На нижнем – вторая ЗНС ионограмма, зарегистрированная в конце периода диагностики явления ЗНС, с теми же характерными чертами, но в резко изменившейся ионосферной обстановке.

Таблица 3

Номер ионо- граммы	$f_oF2$ , МГц	$f_xF2$ , МГц	$f_oS$ , МГц	$f_xS$ , МГц	$\Delta h$ , км	$f_zS$ , МГц	$\varphi$	$\lambda$	Высота км	Время
569	12.5	-	12.3	12.8		-				
574	12.9	13.4	12.4	13.0	170	-	20.41	117.81	353.71	
577	13.0	13.5	12.6	13.1	150	-	21.59	118.83	353.71	
585	11.4	-	11.3	11.9	250	11.0	24.71	121.64	353.79	18:28:00
593	9.8	10.6	9.8	10.3	350	9.4	27.76	124.60	353.96	18:29:04
602	8.6	9.2	8.2	8.8	360	7.8	31.09	128.15	354.25	18:30:16
606						7.5	32.53	129.81	354.40	18:30:48

Ранее мы отмечали, что иногда явление ЗНС совпадает по времени и пространству с макромасштабными ионосферными неоднородностями [11], которые представляют собой положительные неоднородности в форме дисков с размерами около тысячи и более километров. К сожалению, в литературе нет информации о внутреннем устройстве диска. Однако ясно, что если диски Калинина и явление ЗНС описывают одну и ту же неоднородность, то ЗНС следует рассматривать как краевой эффект соответствующего диска. Но здесь можно усмотреть противоречие с резко отличными параметрами ионосферы в начале и конце сеанса ЗНС. Поэтому на данной стадии изучения эффекта ЗНС следует продолжать накопление экспериментальных фактов, трактуя причину ЗНС не как неоднородность с известными размерами, а как горизонтальный градиент электронной плотности, параметры которого по высоте и по горизонтальной дальности, могут быть вычислены. Эти вычисления основаны на траекторном синтезе ионограмм [12] и могут быть проведены для каждой качественной ионограммы.

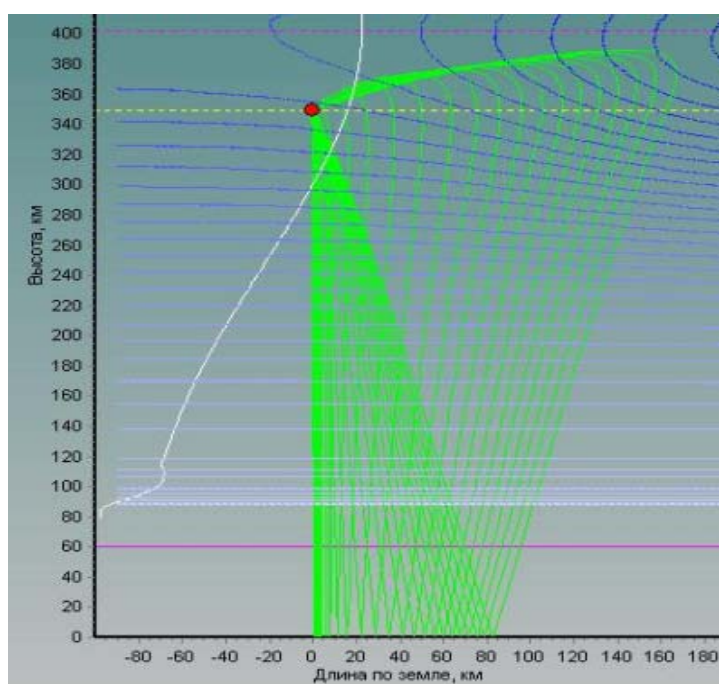


Рис. 8. Результаты траекторного синтеза одной реальной ионограммы.

На рис. 8 показаны результаты такого траекторного синтеза одной реальной ионограммы, который иллюстрирует, прежде всего, тот факт, что внутреннее строение градиента или неоднородности есть система последовательно нарастаемых (нарастающих) слоев (прослоек, фрагментов) увеличивающейся электронной плотности,

как и показано на рис. 8. Такая система траекторий обеспечивает непрерывность и монотонность следа ЗНС. Величина горизонтального градиента на высоте ИСЗ, который обеспечивает разворот всех лучей в диапазоне от 10.2 до 15.9 МГц, равна  $\sim 36$  кГц/км. Здесь также хорошо видно, что формулы для модели неоднородности весьма условны. Эксперимент проверяет и подтверждает только ту часть модели, которая находится в зоне тех лучей, которые показаны на рисунке. Эту зону естественно называть «зоной ответственности» эксперимента для подтверждения реальной значимости модели явления ЗНС.

Контрастность горизонтального градиента может быть вычислена методом лучевых траекторий, как это показано на рис. 8, но её оценки могут быть сделаны и непосредственно по ионограмме (параметр  $\Delta_n$ ) после накопления опыта результатов расчетов по лучевым траекториям.

Отметим также, что наличие дисков Калинина определяется после сложных статистических расчетов на основе данных значительного количества наземных ионосферных станций. При радиозондировании со сверхнизких орбит (разумеется, в случае, если будет доказана тождественность явления ЗНС и дисков Калинина) края этих дисков видны непосредственно на ионограммах.

В большинстве случаев ЗНС встречаются на последовательности ионограмм. Однако встречаются и отдельные единичные ионограммы с ЗНС. Последовательности ионограмм с ЗНС довольно часто бывают длиной до нескольких тысяч км. Особенно интересно, что явление ЗНС, возможно, существует значительно дольше, чем следовало бы из элементарной теории расплывания ионосферных неоднородностей. Один из экспериментов, а, именно, эксперимент 5 мая 1999 г. в южном полушарии над Индийским океаном вызвал особый интерес после того, как выяснилось, что на двух последующих витках приблизительно в одном и том же месте были зафиксированы ЗНС следы. В обоих случаях здесь были получены достаточно качественные ионограммы, которые позволили провести количественные исследования методом траекторного синтеза и методом кригинга [13]. Эти работы показали, что существует большая вероятность того, что это одна и та же неоднородность. Следует отметить, что независимая обработка данных глобальной сети наземных ионосферных станций по методу Калинина также показала прохождение диска Калинина в этом месте в это же время.

После этого были предприняты специальные поиски явления ЗНС на смежных витках. Результат оказался удивительным. За время эксперимента 1999 г. на КС «МИР» было проведено 2 суточных сеанса практически непрерывного радиозондирования ионосферы (ионограммы снимались через 8 или через 16 секунд) 31 марта – 1 апреля и 10 – 11 марта. В первом сеансе ЗНС наблюдались на 9 последовательных витках в районе земного экватора.

Следует отметить, что практически во всех эпизодах суточной серии 31 марта эффект ЗНС наблюдался достаточно уверенно, однако качество ионограмм в большинстве случаев было низким. Рис. 9 иллюстрирует наблюдаемые эффекты. Под рисунком отмечены градусы географической долготы. На трех нижних фрагментах рис. 9 показано глобальное распределение критической частоты слоя  $F_2$  по модели IRI для первого, пятого и девятого витков. Вертикальные штрихи на них указывают приблизительно середину периода наблюдения ЗНС. Из этого рисунка видно, что явление ЗНС происходит в суточном ходе изменений электронной концентрации приблизительно в полдень местного времени, когда процессы быстрого роста и соответственно резких градиентов в электронной концентрации уже миновали.

Во втором сеансе суточных наблюдений КС «МИР» явление ЗНС наблюдалось только в одном эпизоде над Западной Африкой. В течение этих контролируемых суток максимум ионосферы находился, как правило, ниже станции и поведение ионосферы относилось по характерным признакам скорее к зимнему состоянию.



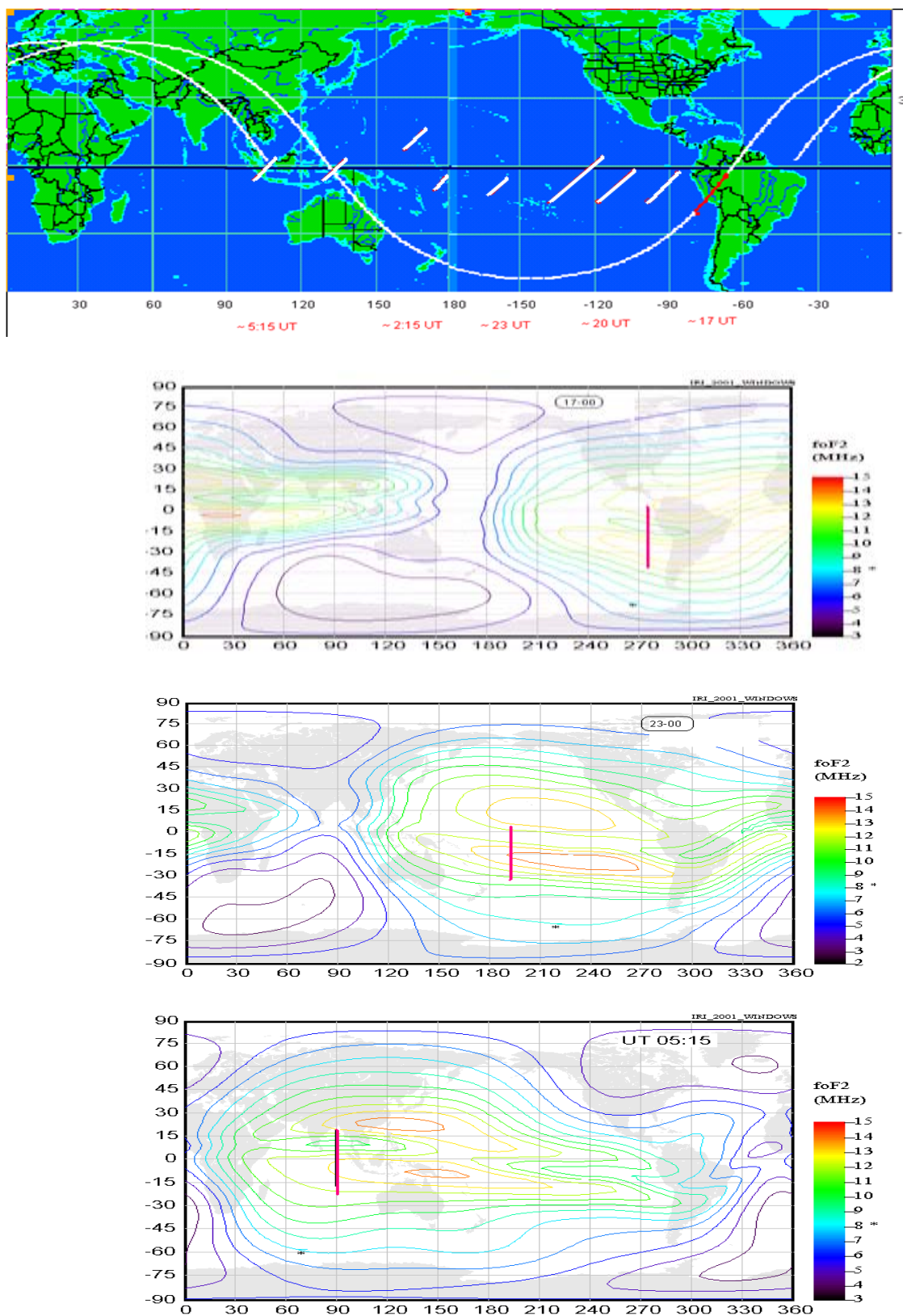


Рис. 9. На верхнем фрагменте рисунка показана проекция на поверхность Земли витка №2921 траектории станции «МИР» с выделением участка траектории наблюдения ЗНС. Слева от этого участка показаны части проекций последующих 8 витков, на которых наблюдались ЗНС. На трех нижних фрагментах показано глобальное распределение критических частот в максимуме ионосферы по модели ИРИ. Вертикальными черточками показано ориентировочное время и место середины сеанса проявления эффекта ЗНС.

## ВЫВОДЫ:

1. Феноменологическое описание ионограмм с КС «МИР» находится в рамках тех пределов и определений, которые были даны для ионограмм внешнего и наземного зондирования в международной инструкции. Новое явление ЗНС просто добавляет новые параметры, которые определяются феноменологически теми же принципами, что и старые.

2. Расположение ионозонда вблизи максимума области  $F2$  по сравнению с «классической» 1000 км орбитой с точки зрения, как исследования, так и мониторинга ионосферы имеет и достоинства и недостатки. При этом основные параметры ионосферы могут быть получены при любой высоте ИСЗ.

Достоинства радиозондирования из окрестности максимума области  $F2$ :

- более короткие следы  $h'_o(f)$  и  $h'_x(f)$ , а во многих случаях и  $h'_z(f)$ , между спутником и максимумом предполагает существенное сокращение ошибок вследствие накопления ошибок расчета  $Nh$  - профиля по вине плохого учета зависимости функции напряженности магнитного поля от высоты, с одной стороны, и, с другой стороны, накопления ошибок счета вследствие очень длинной  $h'(f)$  -кривой;

- при положении спутника ниже высоты максимума появляется возможность простого определения существования неоднородностей ионосферы и, по-видимому, диагностики их внутреннего строения. При этом можно более тщательно изучить высотную зависимость электронной плотности в области между спутником и высотой максимума приблизительно в 100 - 150-ти километровой горизонтальной окрестности точки зондирования.

Недостатки радиозондирования из окрестности максимума области  $F2$ :

- более высокое расположение спутника позволяет наземному пункту получать информацию о состоянии ионосферы с большего участка траектории, соответственно с низкого, меньшее;

- низкое положение дает меньше возможностей для изучения и мониторинга внешней ионосферы, в частности, вряд ли можно будет фиксировать положение «стенок» ионизации в полярной ионосфере.

3. Положение спутника относительно высоты максимума определяется аппаратным способом просто и надежно. При этом точное знание высоты аппарата известное из навигационных измерений может существенно уточнить высоту максимума, полученную по данным радиозондирования ионосферы.

4. Предварительное рассмотрение показывает, что внутреннее строение ЗНС неоднородности скорее всего представляет собой систему последовательно наращиваемых слоев (прослоек, фрагментов) увеличивающейся электронной плотности.

5. При анализе девяти последовательных витков приблизительно на одной траектории потенциально возможного движения неоднородности обнаружены эффекты ЗНС, имевшие место вблизи местного полдня, что свидетельствует, что ЗНС не является эффектом терминатора.

6. Наличие как существенных достоинств так и значительных недостатков расположения ионозондов на высотах  $\sim 350$  км предполагает для целей планетарного мониторинга ионосферы создание системы спутников, в которой целесообразно присутствие ИСЗ на ультранизких орбитах или на эллиптических орбитах с перигеем, достигающим высот 330 – 370 км.

7. На орбитальных обитаемых космических станциях (типа МКС или КС «МИР») целесообразно использование ионозондов.

Авторы выражают благодарность В. П. Никитскому, в 1998 – 1999 гг. работавшему заместителем Генерального конструктора НПО «Энергия», и сотрудникам - М. А. Скуратовой, Ю. Ю. Басову, И. В. Борисову, Л. П. Борисовой, а также космонавтам 26 и 27 экспедиций на КС «Мир» Г. И. Падалке, С. В. Авдееву, Ю. М. Батурину,



В. М. Афанасьеву, которые осуществили юстировку антенны ионозонда, успешно провели все упомянутые выше сеансы измерений и доставили на Землю результаты эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилкин Н. П. Просвечивание ионосферы на границе диапазона ее радиопрозрачности. Радиотехника, 1985, № 9. с.3–12.
2. Danilkin N. P. Transionospheric radiosounding. // J. of Atmosph. and Terr. Physics (JATP). V.56. N.11. P. 1423-1430. 1994.
3. Данилкин Н. П. Трансионосферное радиозондирование как средство контроля состояния ионосферы. Ионосферно-магнитная служба. Под ред. Авдюшина С. И., Данилова А. Д. Л.: Гидрометеиздат, 1987, с. 79– 110.
4. Данилкин Н. П., Вайсман Г. М. Расположение спутниковых ионозондов для глобального мониторинга ионосферы. Геомагнетизм и аэрномия, 1997, т.37. №1. с.191-194.
5. Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф., Мальцева О. А. Особенности радиозондирования ионосферы с ИСЗ // Геомагнетизм и аэрномия, 1998, т. 38, № 6. с. 114- 121.
6. Danilkin N. P., Kotonaeva N. G., Mitchell C. N. Comparison of the results of ionospheric radiosounding on board the MIR Manned Space Station with the data of ionospheric ground-based network and the TRANSIT signal observations //Intern. J. Geomagn. and Aeronom. 2003, V.4. N. 1. P. 29-36.
7. Pulnits S. A., Danilkin N. P., Kotonaeva N. G., Depuev V. Kh., Jann-Yeng Liu, Chuo Y. J., «Mir» space station topside sounder: Possibilities for equatorial anomaly study // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. 2001, v.12. No 3, p. 525-536.
8. Danilkin N. P. New ionograms observed by satellite radio sounding from below of the F - layer maximum // Buletin INAG. [www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-inag/index.html](http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-inag/index.html). 2003.
9. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с английского второго издания “URSI HANDBOOK OF IONOGRAM INTERPRETATION AND REDUCTION”. М.: Наука. 1978.
10. Зондирование ионосферы сверху. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. Тематический выпуск, 1969, т. 57. № 6. (перевод на русский язык) Proc. of the IEEE. Special issue on topside sounding. June, 1969.
11. Kalinin Yu. K., Danilkin N. P., Kotonaeva N. G., Larichev L., Sergeenko N. P. Macro-scale ionospheric irregularities registered by the “MIR” onboard ionosonde // Intern. J. of Geomagn. and Aeronom. 2004, v.5. N.1. p.1-6.
12. Котонаева Н. Г., Скоморох Р. В. О структурных параметрах макронеоднородности ионосферы по данным радиозондирования с высот ниже максимума слоя F2. Геомагнетизм и аэрномия. 2006, т.46. №6. с. 1-7.
13. Данилкин Н. П., Котонаева Н. Г., Анишин М. М. Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах - новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы. Известия вузов. Радиофизика, 2006, т. XLIX. №1. с. 9-19.

## Тренды параметров ионосферного слоя $F2$ и динамики термосферы

А. Д. Данилов

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: adanilov99@mail.ru*

Дан обзор исследований автора за последнее десятилетие в направлении выделения трендов параметров ионосферного слоя  $F2$  и динамики термосферы. Сформулирована проблема определения трендов параметров термосферной динамики на основании анализа трендов параметров ионосферного слоя  $F2$ . Показано, что все исследованные параметры приводят к одному результату: после «граничной даты» (примерно 1980 г.) наблюдается систематическое изменение этих параметров (долговременный тренд), что говорит об изменении динамического режима термосферы из-за охлаждения и оседания всей средней и верхней атмосферы.

Ключевые слова: ионосфера, долговременные тренды, термосфера, динамические процессы

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных трендов параметров средней и верхней атмосферы привлекает к себе внимание исследователей уже второе десятилетие. Причина такого внимания очевидна – твердо установленные изменения состава и теплового режима тропосферы и стратосферы (увеличение количества парниковых газов, уменьшение количества озона в стратосфере) не могут не сказаться на строении и поведении во времени вышележащих атмосферных слоев – мезосферы и термосферы. Очевидно, что при этом неизбежно ожидать долговременных трендов параметров ионосферы, поскольку последняя зависит от состояния нейтральной атмосферы.

Попытки найти тренды двух основных параметров ионосферного слоя  $F2$  предпринимались неоднократно в конце прошлого и начале нынешнего десятилетия. Не вдаваясь в детали большого количества работ, в которых принимал активное участие и автор, сошлемся на работы [1, 2], где подводится некий итог исследований долговременных трендов  $foF2$  и  $hmF2$  и даны соответствующие ссылки на оригинальные публикации.

В начале прошлого десятилетия автор предложил анализировать не абсолютные величины указанных параметров, а их отношения в разные моменты суток. Результат дал весьма обнадеживающие результаты, которые кратко описываются ниже. В ходе дальнейшего анализа выяснилось, что величины  $foF2$  и  $hmF2$ , взятые для соответствующих моментов суток (день, ночь, послезаходные условия) могут дать информацию о трендах динамических процессов в термосфере.

Здесь нет необходимости в подробном описании всех аспектов этой сложной проблемы. Отметим лишь, что в настоящее время сформулирована концепция охлаждения и оседания всей толщи атмосферы от стратосферы до термосферы [3] из-за увеличения количества парниковых газов (прежде всего –  $\text{CO}_2$ ). Эта концепция основана на целой группе параметров средней и верхней атмосферы (температура в стратосфере и мезосфере, поглощение радиоволн в области D, электронная концентрация в ионосферных слоях D, E и F1, высота слоя E, электронная температура в верхней части F области и

плотность термосферы на высотах 400 - 500 км), тренды которых установлены достаточно надежно. Существенно, что тренды всех указанных выше параметров качественно (и частично количественно) описываются в рамках современных теоретических моделей, учитывающих реальное изменение количества парниковых газов на сегодняшний день. В более поздней работе Ластовичка [4] подтвердил основные положения указанной концепции и привел ряд новых результатов. В частности, показано, что уменьшение количества озона в стратосфере существенно усиливает эффект охлаждения мезосферы и нижней термосферы. Например, на высоте 110 км, где эффект максимален, учет уменьшения озона увеличивает отрицательный тренд температуры с - 2 К за десятилетие до - 6.5 К за десятилетие.

Одновременно авторы работы [3] не включили в число параметров, тренды которых известны и взаимно согласуются в рамках указанной концепции, параметры ионосферного слоя  $F2$  ( $foF2$  и  $hmF2$ ) и динамические процессы в термосфере и мезосфере. Как уже говорилось выше, проблема определения трендов критической частоты и высоты слоя  $F2$  рассматривалась неоднократно (см., например, обзорные работы [1, 2]). Не смотря на предпринятые усилия многих групп исследователей, пока не удалось получить согласованной картины трендов  $foF2$  и  $hmF2$  за последние десятилетия. Что касается трендов термосферной динамики (горизонтальных термосферных ветров), то экспериментальные данные по этому вопросу скудны и противоречивы (см., например, [5-10]). В то же время, из самых общих соображений очевидно, что указанное выше охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы не может не привести к существенному перераспределению факторов, генерирующих ветры в мезосфере и термосфере и, следовательно, к заметным изменениям самих ветров.

Поскольку трудно ожидать в ближайшие годы надежных данных о трендах термосферной динамики из-за отсутствия соответствующих долговременных наблюдений ветров, автор [11-18] предпринял ряд попыток хотя бы качественно оценить возможные тренды в термосферных ветрах на основании анализа данных о параметрах слоя  $F2$ ,  $foF2$  и  $hmF2$ . Такой подход представляется разумным по двум причинам. Во-первых, слой  $F2$  весьма чувствителен к изменениям термосферных ветров. Во-вторых, имеются наблюдения слоя  $F2$  методом вертикального зондирования в течение нескольких десятилетий на обширной глобальной сети станций, в то время измерения термосферных ветров ограничены во времени и в пространстве.

Целью данной работы является краткое изложение уже опубликованных авторам ранее результатов, касающихся трендов отношения самих величин  $foF2$ , а также получения информации о трендах термосферной динамики из данных вертикального ионосферного зондирования. Автор надеется привлечь этой публикацией внимание специалистов, которые имеют доступ к данным вертикального зондирования за несколько десятилетий, к описываемой проблеме с тем, чтобы они проверили, уточнили и продолжили полученные результаты на более полных (и особенно на охватывающих последнее десятилетие) наборах ионосферных данных.

## 2. ВАРИАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ $foF2$ (ночь) И $foF2$ (день)

Ванина и Данилов [20] впервые обнаружили, что имеется значимая отрицательная корреляция между величинами  $foF2$ , взятыми для ночного (02:00 LT) и дневного (14:00 LT) моментов одних и тех же суток. Коэффициент этой корреляции был обозначен как  $R(foF2)$ .

Для анализа поведения любого ионосферного параметра со временем на масштабах нескольких десятилетий необходимо избавиться от влияния солнечной активности. При поиске трендов всех параметров, рассматриваемых в данной работе, для этой цели использовалась регрессионная зависимость относительно среднегодовой величины

солнечного индекса  $F(10.7)$ . Поскольку оказалось, что можно ожидать некий тренд после примерно 1980 г., для построения этой зависимости использовались только данные до 1980 г. Чтобы избавиться от эффекта солнечной активности, применялся простой метод, использованный во многих работах по трендам в области  $F2$  (см. [19]). По данным до 1980 г. строилась линия регрессии и для каждой точки находилось отклонение от нее:  $\Delta R(foF2) = R(foF2)(\text{наб}) - R(foF2)(\text{рег})$ , где  $R(foF2)(\text{наб})$  и  $R(foF2)(\text{рег})$  представляют собой величины  $R(foF2)$ , полученные методом описанным выше и соответствующие линии регрессии, соответственно. Примеры зависимости анализируемых ионосферных параметров от индекса  $F(10.7)$  будут представлены ниже. Здесь отметим лишь, что в работах [20-21] была получена отрицательная зависимость  $R(foF2)(\text{min})$  от  $F(10.7)$  для всех рассмотренных станций. Дальнейший анализ всех долговременных трендов велся для параметров, аналогичных  $\Delta R(foF2)$ , т.е. свободных от влияния солнечной активности.

Максимум отрицательного коэффициента корреляции  $R(foF2)$  приходится на весну и в отдельных случаях достигает 0.8 - 0.9 по абсолютной величине. Анализ поведения со временем величины  $R(foF2)(\text{min})$  на ряде станций вертикального зондирования показал, что, если исключить зависимость  $R(foF2)(\text{min})$  от солнечной активности, то после примерно 1980 г. (этот момент времени впоследствии был назван «граничной датой») наблюдается систематическое увеличение абсолютной величины  $R(foF2)(\text{min})$  [12].

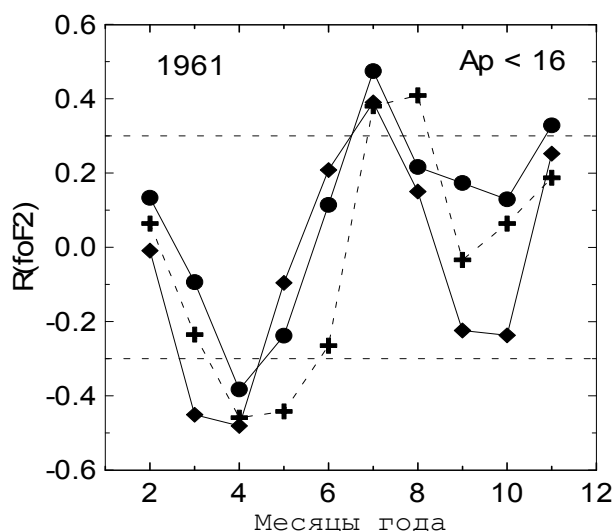


Рис. 1. Сезонные вариации  $R(foF2)$  для 3 станций: Дурбес (кружки), Рим (кресты), и Юлиусру (ромбы). Горизонтальные штриховые линии показывают величины  $R(foF2)$ , необходимые, чтобы обеспечить 99% уровень значимости согласно  $F$  тесту Фишера.

Поведение коэффициента корреляции  $R(foF2)$  со временем для трех ионосферных станций представлено на рис. 1 [14]. Легко видеть, что наряду с минимумом  $R(foF2)$ , который приходится на весенние месяцы, наблюдается также максимум  $R(foF2)$ , приходящийся чаще всего на летне-осенний период. Величины  $R(foF2)$  положительны и обычно лежат в пределах 0.4 - 0.8. На рис. 2 приведены изменения со временем величин  $\Delta R(foF2)(\text{min})$  и  $\Delta R(foF2)(\text{max})$  для станции Норфолк согласно [14].

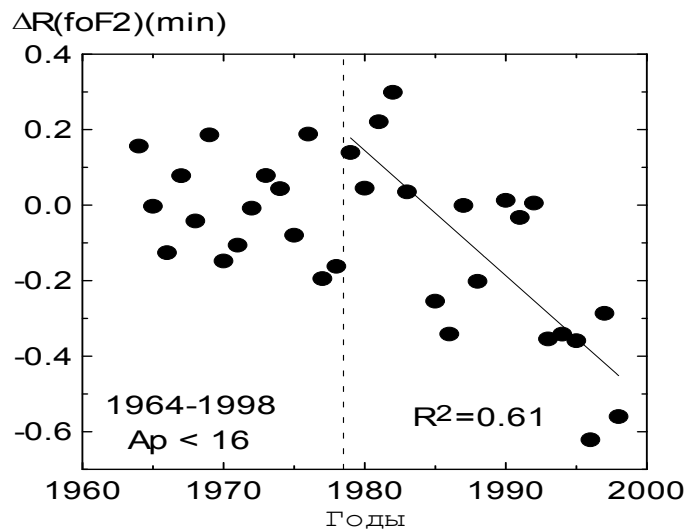


Рис. 2. Поведение со временем величин  $R(foF2)(min)$  и  $R(foF2)(max)$  на станции Норфолк.

Как видно из рис. 2, после «граничной даты» (показана вертикальной штриховой линией) оба коэффициента корреляции систематически уменьшаются, причем величина коэффициента определенности  $R^2$  при имеющемся количестве точек обеспечивает статистическую значимость получаемой зависимости  $\Delta R(foF2)(min)$  и  $\Delta R(foF2)(max)$  от времени после «граничной даты» на уровне 99%. Уменьшение  $\Delta R(foF2)(min)$  означает рост по абсолютной величине отрицательной корреляции, а уменьшение  $\Delta R(foF2)(max)$  означает уменьшение положительной корреляции.

Автором были рассмотрены возможные процессы, приводящие к указанным систематическим изменениям  $R(foF2)(min)$ . Было получено [12, 21], что увеличение положительной корреляции связано с усилением со временем направленного к полюсу горизонтального ветра в термосфере или с увеличением его изменчивости. Что касается уменьшения  $R(foF2)(max)$ , то здесь картина более сложна. Предположительно [16] это уменьшение связано с систематическим усилением зонального ветра.

### 3. ВАРИАЦИИ ОТНОШЕНИЯ $foF2(ночь)/foF2(день)$

В серии публикаций автора [11-13, 22-23] были рассмотрены тренды отношения критических частот  $foF2$ , взятых для ночного (02:00 LT) и дневного (14:00 LT) моментов одних и тех же суток. Основная идея такого подхода состоит в том, что дневные величины  $foF2$  почти не чувствительны к динамическим процессам (за исключением высоких широт, где существенную роль могут играть электрические поля, вызывающие дрейф слоя  $F2$ ) и определяются, главным образом, балансом фотохимических процессов, тогда как в ночное время (из-за отсутствия ионизации прямым солнечным излучением) влияние динамических процессов (прежде всего, горизонтального ветра, приводящего к смещению слоя  $F2$  по высоте) может быть весьма существенно.

Анализ величины  $foF2(02)/foF2(14)$  проводился для трех ситуаций. В первой из них из двух анализируемых месяцев выбирались дни с  $Ap < 30$ . Это соответствует большей части дней за исключением достаточно сильных геомагнитных возмущений. Ситуация, когда выбирались дни с  $Ap < 6$ , соответствует рассмотрению только очень спокойных в геомагнитном отношении дней. Ситуация с  $Ap < 16$  представляет собой промежуточный случай. Автором [11] было получено, что величина  $foF2(02)/foF2(14)$ , в отличие от величины  $R(foF2)$ , слабо зависит от ограничений по  $Ap$ . В связи с этим, для

анализа использовались результаты, полученные для  $Ap < 30$ , т. к. они по очевидным причинам лучше обеспечены статистически.

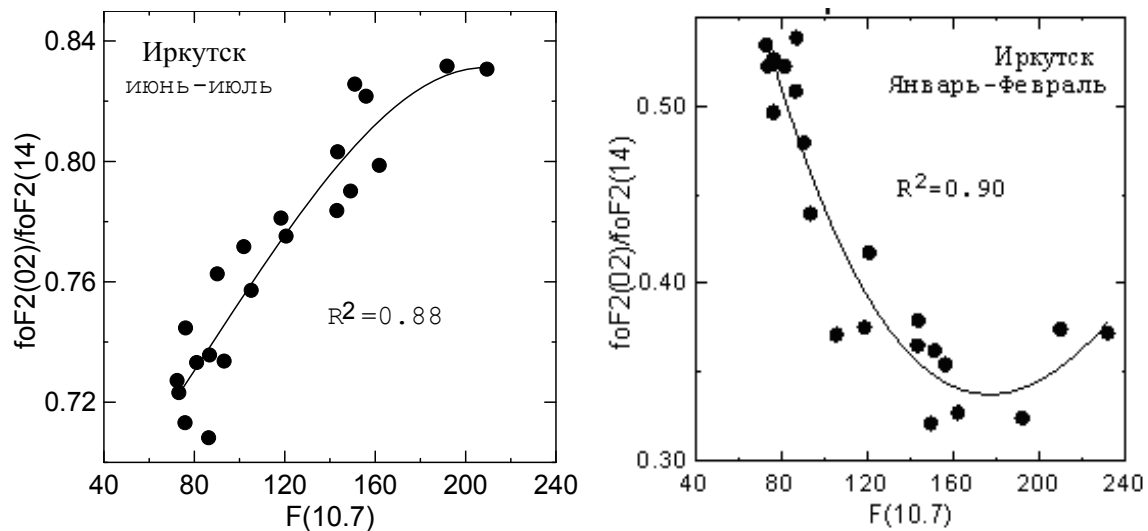


Рис. 3. Примеры зависимости величины  $foF2(02)/foF2(14)$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$ .

Рассматривались два периода года: январь-февраль и июнь-июль. Устранение зависимости  $foF2(02)/foF2(14)$  от солнечной активности проводилось методом, описанным выше для  $R(foF2)$ . Примеры зависимости  $foF2(02)/foF2(14)$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$  приведены на рис. 3. Следует отметить, что характер зависимости  $foF2(02)/foF2(14)$  от солнечной активности оказался различным для летнего (прямая зависимость) и зимнего (обратная зависимость) периодов. Эта закономерность подтверждается и для южного полушария с соответствующей сменой летних и зимних месяцев [12, 14]. Насколько известно авторам, подобный эффект обнаружен впервые.

Первые же работы по анализу поведения отношения  $foF2(02)/foF2(14)$  [12, 14] показали, что после примерно 1980 г. (та самая «граничная дата») наблюдается систематический ход со временем этого отношения (долговременный тренд), причем знак этого тренда может быть как положительным, так и отрицательным. Примеры изменения  $\Delta foF2(02)/foF2(14)$  со временем для случаев отрицательного (а, Ленинград) и положительного (б, Пуатье) тренда приведены на рис. 4. Видно, что, несмотря на разброс точек, указанные изменения после «граничной даты» статистически значимы с высоким уровнем достоверности.

Окончательно было проанализировано 40 ионосферных станции глобальной сети [13, 17]. Результаты определения трендов  $foF2(02)/foF2(14)$  для этих станций для двух сезонов приведены в табл. 1. Как следует из этой таблицы, для всех станций, кроме Таунсвиля, знаки тренда зимой и летом получаются одинаковыми, что повышает надежность полученных результатов в целом. При анализе географического распределения знаков полученных трендов было обнаружено, что знак тренда  $foF2(02)/foF2(14)$  определяется знаком магнитного склонения  $D$  (приведен в последнем столбце Табл. 1). Для станций, близких к нулевой линии  $D$  (Юлиусру, Калининград, Манила, Мундаринг), картина оказывается неустойчивой – тренд либо очень близок к нулю, либо различен для разных сезонов. Это позволило заключить (подробнее см. [13, 17]), что указанный тренд связан с трендом горизонтального зонального ветра в термосфере – со временем усиливается ветер на восток.

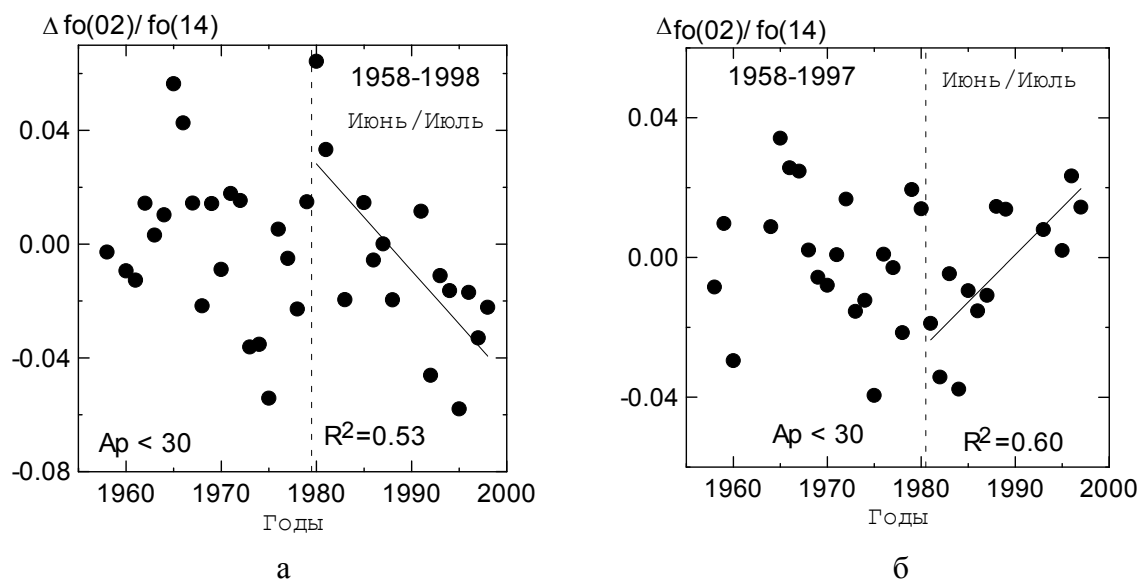


Рис. 4. Примеры отрицательных (а, ст. Ленинград) и положительных (б, ст. Пойтиерс) трендов  $foF2(02)/foF2(14)$  после граничной даты.

Таблица 1

Список ионосферных станций, использованных для анализа

Станция	июнь-июль		январь-февраль		Координаты			D
	k	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>	геогр.	геом.		
Акита	+0.003	0.24	+0.002	0.29	40N	140E	30N	W
Алма-Ата	-0.002	0.44	-0.011	0.66	43N	77E	33N	E
Ахмедабад	+0.005	0.70	+0.002	0.29	23N	73E	14N	W
Ашхабад	-0.004	0.41	-0.002	0.26	38N	59E	30N	E
Боулдер	-0.002	0.13	-0.001	0.53	40N	105W	49N	E
Вакканаи	+0.003	0.40	+0.004	0.63	45N	142E	36N	W
Дурбес	+0.008	0.61	+0.013	0.58	50N	5E	52N	W
Иоханнесбург	+0.005	0.72	-0.005	0.40	26S	28E	27S	W
Иркутск	+0.003	0.14	+0.006	0.45	53N	104E	41N	W
Калининград	-0.003	0.30	0.00		55N	21E	53N	~0
Канберра	+0.003	0.29	+0.007	0.49	35S	149E	44S	E
Кергелен	-0.007	0.94	-0.006	0.40	49S	70E	57S	W
Киев	-0.004	0.68	-0.005	0.25	51N	31E	47N	E
Кокобунжи	+0.003	0.27	+0.009	0.31	36N	140E	26N	W
Ланион	+0.008	0.43	+0.011	0.45	48N	3W	52N	W
Ленинград	-0.004	0.53	-0.003	0.21	60N	31E	56N	E
Манила	-0.006	0.59	+0.006	0.52	15N	121E	4N	~0
Мауи	-0.009	0.84	-0.003	0.24	20N	157W	21N	E
Москва	-0.003	0.67	-0.004	0.48	56N	37E	51N	E
Мундариинг	+0.005	0.53	-0.004	0.28	32S	116E	43S	~0
Новоказалинск	-0.001	0.12	-0.006	0.60	46N	62E	38N	E
Новосибирск	-0.002	0.34	-0.001	0.34	55N	83E	44N	E
Норфолк	+0.003	0.30	+0.006	0.72	29S	168E	34S	E
Нурмиярви	-0.025	0.70	-0.008	0.37	60N	25E	58N	E
Огадугу	+0.007	0.30	+0.006	0.35	12N	1W	16N	W
Окинава	+0.005	0.18	+0.006	0.39	27N	128E	16N	W
Оттава	+0.003	0.22	+0.003	0.42	45N	76W	57N	W
Пуатье	+0.003	0.60	+0.007	0.40	47N	0E	49N	W
Рим	0.00		0.00		42N	13E	43N	~0
Слау	-0.004	0.48	-0.003	0.34	52N	0E	54N	W
Свердловск	-0.002	0.33	-0.004	0.45	57N	61E	48N	E
Ташкент	-0.005	0.26	-0.005	0.51	41N	69E	32N	E
Томск	-0.002	0.31	-0.002	0.25	57N	85E	46N	E
Таунсвилль	+0.001	0.23	-0.003	0.34	20S	146E	28S	E
Уоллопс	+0.004	0.40	+0.005	0.29	38N	75W	49N	W
Хабаровск	+0.002	0.53	+0.004	0.26	49N	139E	38N	W
Хобарт	+0.006	0.56	+0.006	0.37	43S	147E	51S	E
Хуанкайо	+0.011	0.77	+0.15	0.67	12S	75W	01S	E
Чанг-ли	+0.002	0.18	+0.002	0.27	25N	121E	14N	W
Юлиусру	-0.003	0.31	0.00		55N	14E	54N	~0

#### 4. РАЗБРОС ВЕЛИЧИН $hmF2$

Поскольку основным передаточным звеном в механизме влияния изменений ветрового режима на электронную концентрацию в слое  $F2$  служит высота максимума слоя  $hmF2$ , следует ожидать, что она должна реагировать на изменения ветрового режима термосферы. Выше уже указывалось, что автором [11, 22, 23] было получено, что после некоторой «граничной даты» (1980 г. плюс-минус 2 - 3 года) происходят систематические изменения параметров  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  и  $R(foF2)$  вплоть до конца 90-х годов (до конца имеющегося ряда данных). Если это так, то величина  $hmF2$  должна по-разному вести себя в первые годы рассматриваемого в указанных работах массива данных (конец 50-х-начало 60-х годов прошлого века) и в конце этого интервала (90-е годы).

Данилов и Ванина-Дарт [15] сделали попытку проверить это утверждение. Они анализировали изменение не самой величины  $hmF2$  от 60-х к 90-м годам, а степень ее изменчивости в одинаковых условиях – среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ , которое мы ниже для наглядности будем обозначать как  $S(hmF2)$ .

Были использованы данные медианных измерений  $hmF2$  на каждой рассматриваемой станции, приведенные в банках международных центров геофизических данных. Как известно, величина  $hmF2$  зависит от уровня солнечной активности, поэтому просто искать  $S(hmF2)$ , скажем, для данного месяца и часа LT было бы бессмысленно. Мы получили бы большую величину  $S(hmF2)$ , отражающую сильное изменение  $hmF2$  при изменении солнечной активности. Как и в случае поисков трендов  $R(foF2)$  и  $foF2(02)/foF2(14)$  (см. выше), необходимо было избавиться от эффекта солнечной активности. Делалось это в работе [24] следующим образом. Для выбранного массива данных строилась зависимость  $hmF2$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$ . И рассматривалось среднеквадратичное (стандартное) отклонение величин  $hmF2$  от этой зависимости  $\sigma$ , которое и принималось за искомую величину  $S(hmF2)$ . Если брать годы в разных участках всего анализируемого периода, то можно составить представление о том, менялась или нет величина  $S(hmF2)$  со временем в течение последних десятилетий.

Пример такого рода анализа приведен на рис. 5а (ст. Москва) и 5б (ст. Ашхабад). Для обеих станций весь период 1957-1999, для которого имелись данные по  $hmF2$ , был разделен примерно пополам: 1957-1979 и 1980-1999 гг. Причина такого деления связана с тем, что, как уже указывалось выше, для параметров  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  и  $R(foF2)$  было найдено начало систематических изменений (трендов) около 1980 г.

На рис. 5 точки и кресты представляют собой реальные значения медиан  $hmF2$  для месяца марта и момента времени 02:00 LT для первого и второго из указанных выше периодов, соответственно. Сплошная и пунктирная линии представляют собой линейные аппроксимации зависимости  $hmF2$  от  $F(10.7)$  для точек и крестов, соответственно. Собственно величина стандартного отклонения и рассчитывается программой для всех точек относительно сплошной линии и для всех крестов – относительно пунктирной.

Даже без рассмотрения величин  $S(hmF2)$ , даваемых программой, при одном взгляде на рис. 5а и 5б видно, что характер разброса точек относительно аппроксимирующей линии резко отличается для 1957-1979 и 1980-1999 гг. В последнем случае этот разброс намного больше, чем в первом, для обеих рассмотренных на рисунке станций. Величины  $S(hmF2)$  подтверждают количественно то, что видит глаз: значения  $S(hmF2)$  для станции Москва равны 11 и 18 км для более раннего и более позднего периодов, соответственно. Те же величины для станции Ашхабад равны 7.3 и 25 км, соответственно.

В работе [15] было показано, что для всех исследованных среднеширотных станций найденная зависимость подтверждается: величина  $S(hmF2)$  для периода после 1980 г. заметно больше, чем для периода до 1980 г.



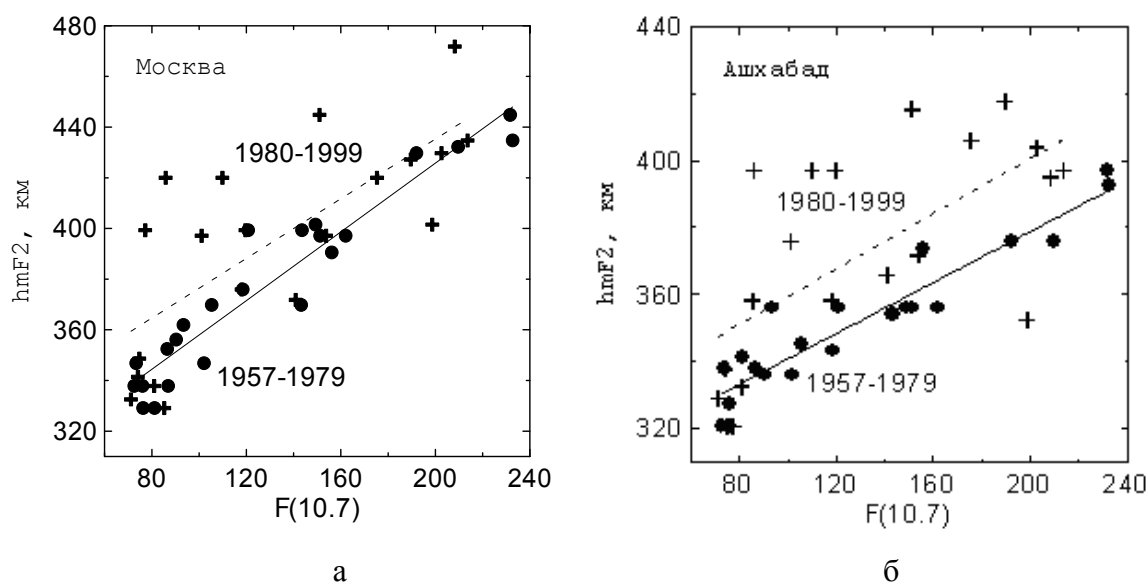


Рис. 5. Изменение со временем величины  $hmF2$  для станций Москва (а) и Ашхабад (б) согласно Данилову и Ваниной-Дарт [2009]. Точки и сплошная прямая относятся к 1957-1979 гг., а кресты и штриховая прямая – к 1980 - 1999 гг.

Второй подход к анализу той же проблемы состоял в следующем [15]. Из того же ряда медиан для 02:00 LT и марта месяца выбирались последовательно периоды в 21 год длиной. Для них тем же способом считалась величина  $S(hmF2)$  и относилась к середине интервала. Таким путем был получен непрерывный ряд величин  $S(hmF2)$ , отражающий постепенное изменение  $S(hmF2)$  в течение всего анализируемого периода. Изменение посчитанных таким образом величин  $S(hmF2)$  для трех среднеширотных станций (Москва, Ашхабад и Пуатье) приведено на рис. 6. Хорошо видно, что, несмотря на некоторый разброс точек, в целом все три станции дают совершенно одинаковую картину: от 1967 г. (интервал 1957 - 1977 гг.) к 1989 г. (интервал 1979 - 1999 гг.) величина  $S(hmF2)$  непрерывно растет. При этом и амплитуда роста, и наклон зависимости  $S(hmF2)$  от  $(F(10.7))$ , для всех трех станций примерно одинаковы. Естественно, это существенно увеличивает статистическую надежность полученных результатов.

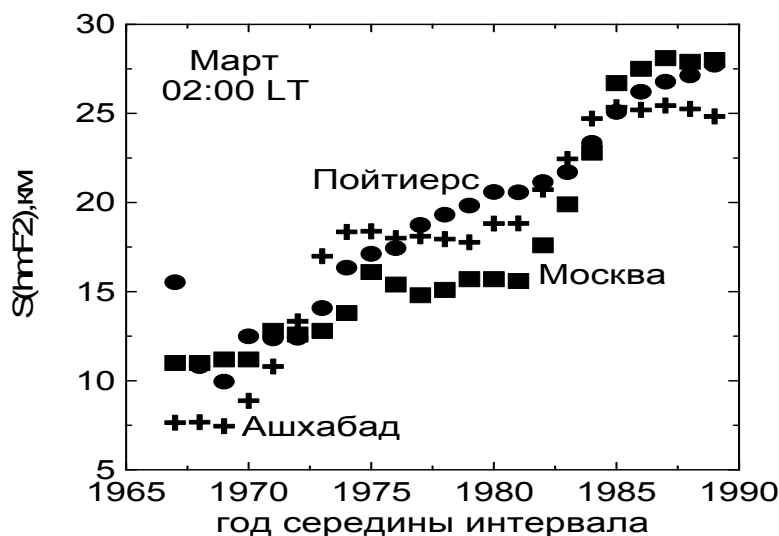


Рис. 6. Изменение величины  $S(hmF2)$  со временем для различных станций согласно Данилову и Ваниной-Дарт [2009].

Все приведенные выше величины  $S(hmF2)$  относились к месяцу марту и моменту 02:00 LT. Этот момент был выбран по следующим причинам. Как указывалось выше, нас интересует, прежде всего, изменение величины  $hmF2$  в ночное время, поскольку именно ночные значения электронной концентрации (а, следовательно, и  $foF2$ ) наиболее чувствительны к изменению высоты слоя. Во всех исследованиях поведения параметров  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  и  $R(foF2)$ , описанных выше, в качестве «ночи» брался именно момент 02:00 LT как наиболее характерный для ночных условий.

Что касается выбора месяца, то анализ сезонного хода величины  $S(hmF2)$  показал [15], что отношение величин  $S(hmF2)$  для более позднего (после 1980 г.) и более раннего (до 1980 г.) периодов, вычисленных для 02:00 LT разных месяцев, имеет максимум в весенние месяцы, когда наиболее хорошо выражен эффект увеличения разброса значений  $hmF2$  от более раннего периода к более позднему. В целом, эффект увеличения  $S(hmF2)$  от более раннего периода к более позднему наблюдается в течение всего года, будучи наиболее ярко выражен в течение весеннего периода.

Данилов и Ванина-Дарт [15] рассмотрели также вопрос о том, зависит ли обнаруженный эффект от выбора дней с различной геомагнитной активностью. Были взяты несколько ограничений по геомагнитной активности:  $A_p < 8, 12, 16, 20$  и  $30$  и не было обнаружено заметных различий в поведении  $S(hmF2)$  при введении ограничений на  $A_p$ . Это говорит о независимости обнаруженного эффекта от геомагнитной активности.

Был проанализирован обсуждаемый эффект для среднеширотных станций ( $30^\circ < \varphi < 60^\circ$ ). Попытки обнаружить эффект увеличения  $S(hmF2)$  на высокоширотных станциях показали, что, хотя тенденция роста  $S(hmF2)$  с годами и наблюдается, разброс данных очень велик и получить четкую картину, обнаруженную для среднеширотных станций, не удастся. Причины этого связаны с тем, что в полярной области во время геомагнитных возмущений возникают ветры в термосфере, полностью меняющие всю картину термосферной циркуляции. В низких широтах, как показано в [15], наблюдаемые эффекты также нарушаются. Причина указанных нарушений ясна: в низких широтах в формировании слоя  $F2$  ионосферы принимают участие наряду с «обычными» процессами глобальной циркуляции также специфические процессы, прежде всего – вариации электрических полей, который могут полностью исказить картину поведения высоты  $hmF2$ .

Таким образом, полученные в [15] результаты указывают на то, что разброс величин  $hmF2$ , характеризуемый параметром  $S(hmF2)$ , существенно возрос за период с 1950-х по 1990-е годы. Этот результат очень важен для развиваемой авторами концепции (см. выше) о том, что наблюдаемые тренды параметров  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  и  $R(foF2)$  вызваны изменениями в течение последних десятилетий системы термосферных ветров. При этом указанные изменения могут быть как односторонне направленными (например, систематическое усиление меридионального ветра к полюсу), так и имеющими колебательный характер (например, более частая смена направления зонального или меридионального ветра на противоположный). Подобные изменения параметров глобальной циркуляции могут происходить вследствие изменений температурного режима термосферы и средней атмосферы, происходящих из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов (см. выше).

Существенно, что эффекты в  $foF2$ , предположительно связанные с трендами параметров термосферной циркуляции, наиболее хорошо выражены в весенний период (см. выше). И именно в весенний период в [15, 24] был получен наибольший эффект роста  $S(hmF2)$  от более ранних лет к более поздним. Это является косвенным подтверждением связи двух групп явлений.

Следует подчеркнуть, что обнаруженное сильное увеличение разброса величин  $hmF2$  к 90-м годам может объяснить трудности, с которыми встретились исследователи при попытках выделить долговременные тренды  $hmF2$  за период 50-х-90-х годов (см., например, [19, 25, 26]).

## 5. ПОВЕДЕНИЕ $foF2$ ПОСЛЕ ЗАХОДА СОЛНЦА

Выше мы описали предложенные автором методы получения информации о динамике термосферы на основании анализа данных об  $foF2$  и  $hmF2$ . Не вдаваясь в детали предложенных методов, отметим только, что они основаны на двух принципах. Первый – термосферный ветер определяет высоту максимума слоя  $F2$ ,  $hmF2$ , поэтому долговременные тренды этой высоты являются индикатором изменения термосферных ветров. Второй – в разные моменты суток величина максимальной электронной концентрации в слое  $F2$  (и, следовательно, величина  $foF2$ ) в разной степени зависят от горизонтального ветра в термосфере. В дневных условиях электронная концентрация определяется, главным образом, фотохимическими процессами, а вклад динамических процессов мал. По мере ослабления ионизации солнечным излучением (вечер, ночь) роль динамических процессов резко возрастает и они становятся определяющим фактором изменения  $[e]$  и  $foF2$ .

В работе [27] была предпринята попытку проанализировать изменение отношения  $foF2$  не для двух фиксированных моментов местного времени, как это было сделано в предыдущих работах (см. выше параграф 3), а для  $LT = 14:00$  и одного из моментов после захода Солнца ( $T(\text{зах})$ ). Первый момент соответствовал характерным дневным условиям. Второй момент  $T(\text{зах}+2 \text{ ч})$  был выбран из следующих соображений. Согласно Ришбету [28] вклад в  $foF2$  вертикального дрейфа, вызванного ветром, должен быть максимален именно в послезаходный период через один-два часа после захода Солнца. Были проверены пробные расчеты также для момента  $T(\text{зах}+1 \text{ ч})$ . Они дали практически те же результаты, что и расчета для  $T(\text{зах}+2 \text{ ч})$ .

Рассматривалось отношение величины  $foF2(\text{зах}+2)$  к величине  $foF2(14)$ , и к этому отношению  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  на первом этапе анализа применялся точно такой же подход, как и к анализу отношения  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$ , описанному выше в параграфе 3. Рассматривались два периода года: январь-февраль и июнь-июль. Поскольку анализ отношения  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  показал, что результаты не зависят от выбранного ограничения по  $A_p$ , анализировались величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  для условий  $A_p < 30$ , поскольку по очевидным причинам они лучше обеспечены статистически.

Как и в случае анализа величин  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$ , для устранения эффектов солнечной активности строились зависимости величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$ . Примеры такой зависимости для станций Ашхабад и Чанг-Ли приведены на рис 7а и 7б. Существенно, что при построении этих зависимостей брались данные по  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  с начала наблюдений на данной станции (в большинстве случаев – 1958 г.) только до 1979 г. Это делалось потому, что ранее было найдено (см. выше параграф 3), что примерно после 1980 г. начинается систематическое изменение  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  со временем (тренд), которое мы как раз и ищем в поведении величин  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$ . Как следует из рис. 7а и 7б, зависимость отношения  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от  $F(10.7)$  очень четко выражена. Величины  $R^2$  значительно выше, чем в среднем соответствующие значения для зависимости от  $F(10.7)$  отношения  $foF2(02)/foF2(14)$ . Это, во-первых, является дополнительным аргументом правильности выбора моментов времени и, во-вторых, повышает надежность устранения эффекта зависимости от солнечной активности.

Вычислялось среднеквадратическое отклонение  $S$  величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от модели, даваемой аппроксимацией на рисунках типа 7а и 7б, для скользящих 11-и летних интервалов (1958 - 1968, 1959 - 1969 гг. и т.д.), причем полученные значения относились к середине интервала (1963, 1964 гг. и т.д.).

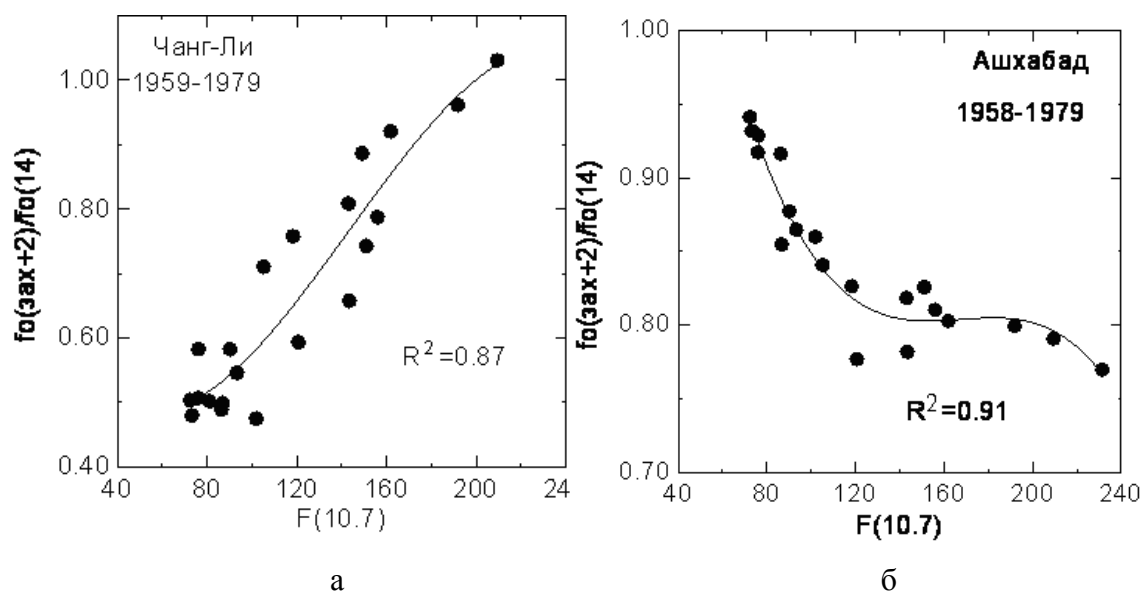


Рис. 7. Зависимость величины  $foF2(зах+2)/foF2(14)$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$  для станций Чанг-Ли (а, январь - февраль) и Ашхабад (б, июнь - июль).

Поскольку предыдущие исследования показали, что после так называемой «граничной даты» (около 1980 г.) ход параметров слоя  $F2$  изменяется, мы проводили линейную аппроксимацию полученных в результате 11-летнего сглаживания точек отдельно для периодов до и после «граничной даты». Для периода после «граничной даты» вычислялся также коэффициент определенности  $R^2$  (см. выше), который позволяет судить о том, насколько статистически значимы тренды стандартного отклонения величины  $foF2(зах)/foF2(14)$ , полученные для периода после «граничной даты».

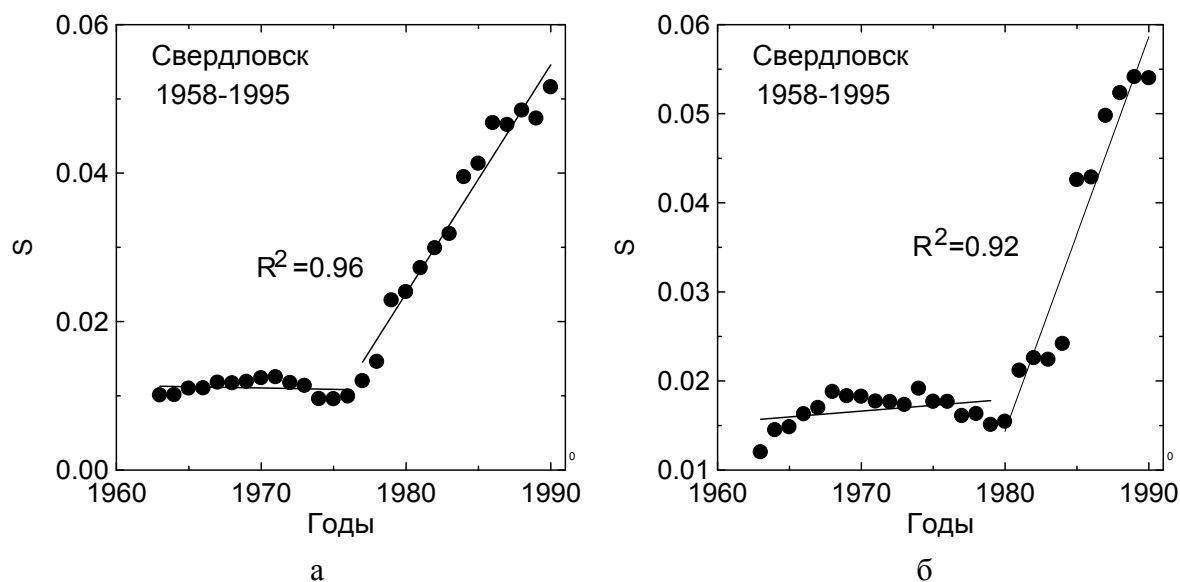


Рис. 8. Зависимость величины  $S$  от времени для станции Свердловск в январе - феврале (а) и июне - июле (б).

Примеры изменения величины  $S$  со временем для различных сезонов на станции Свердловск приведены на рис. 8 [27]. Этот рисунок представляет собой пример картины, близкой к «идеальной». На первом временном этапе (до «граничной даты») величина  $S$

мала и практически постоянна (нет выраженного хода  $S$  со временем). Это естественно, поскольку именно для этого периода строилась «модель» - зависимость  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от  $F(10.7)$ . После «граничной даты» наблюдается хорошо выраженный рост  $S$  со временем (положительный тренд). На рис. 8 видно, что для зимнего периода (январь - февраль) «граничная дата» совпадает со средней величиной (1980 г.), полученной в более ранних исследованиях авторов. В летний период (июнь-июль) рост величины  $S$  начинается несколько ранее и «граничная дата» соответствует 1976 - 1977 гг.

Таблица 2

Стандартное отклонение  $S$  и отношение  $K$  величин  $S$  для разных периодов

Станция	январь/фев	январь/фев	$K$	июнь/июль	июнь/июль	$K$
	До 1980 г.	После 1980 г.		До 1980 г.	После 1980 г.	
Ашхабад	0.0164	0.0351	2.14	0.0177	0.033	1.86
Боулдер	0.0197	0.0393	1.99	0.018	0.0307	1.71
Вакканаи	0.0205	0.0332	1.62	0.0201	0.023	1.14
Дурбес	0.0311	0.0301	<b>0.97</b>	0.0192	0.0263	1.37
Иркутск	0.0164	0.0337	2.05	0.0158	0.0235	1.49
Канберра	0.0187	0.0238	1.27	0.0181	0.0145	<b>0.80</b>
Кокобунджи	0.0147	0.0376	2.56	0.0297	0.0368	1.24
Москва	0.0138	0.0339	2.46	0.0197	0.0236	1.20
Оттава	0.0250	0.0293	1.17	0.0271	0.0485	1.79
Пойтиерс	0.0251	0.033	1.31	0.0316	0.0371	1.17
Рим	0.0258	0.03	1.16	0.0374	0.0334	<b>0.89</b>
Слау	0.0293	0.0487	1.66	0.0205	0.0286	1.40
Свердловск	0.0167	0.0365	2.19	0.012	0.0395	3.29
Томск	0.0174	0.0379	2.18	0.0148	0.019	1.28
Таунсвилль	0.0489	0.0467	<b>0.96</b>	0.0145	0.022	1.52
Хобарт	0.027	0.0415	1.54	0.0204	0.0201	<b>0.99</b>
Чанг-Ли	0.0665	0.103	1.55	0.0378	0.0431	1.14
Юлиусру	0.0276	0.0473	1.71	0.0568	0.0764	1.35

Не для всех станций картина выглядит такой же идеальной, как на рис. 8, однако в среднем величины  $S$  для периода после 1980 г. заметно (и статистически значимо) выше, чем для периода до 1980 г. Указанное утверждение иллюстрирует табл. 2. В ней для всех проанализированных станций для двух сезонов приведены средние величины  $S$  для периодов до 1980 г. и после 1980 г., а также отношение этих величин  $K$ . Как видно из табл. 2, в подавляющем большинстве случаев (31 из 36) величина  $K$  больше единицы. Это говорит о том, что величины  $S$  после «граничной даты» систематически выше, чем до нее. Пять случаев исключений ( $K < 1$ ; выделено жирным шрифтом в табл. 2) объясняются, видимо, ошибками в исходных данных по  $foF2$ , использованных для анализа [27].

Таким образом, получено, что для всех рассмотренных ионосферных станций наблюдается тренд стандартного отклонения  $S$  величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  – со временем величина  $S$  растет. В большинстве случаев это выражается в непрерывном росте  $S$  после «граничной даты» как в примерах на рис. 8, однако в некоторых случаях разброс точек не позволяет получить гладкую кривую, но превышение величин  $S$  для периода после 1980 г. над соответствующими величинами до 1980 г. хорошо выражено и статистически значимо.

Рассмотрим выводы, следующие из приведенного факта. Во-первых, подтверждается то обстоятельство, что около 1980 г. (плюс-минус 2 - 3 г.) происходит некое изменение в режиме ионосферы – после этой «граничной даты» наблюдаются

тренды ее параметров. Это обстоятельство отмечалось автором ранее (см. предыдущие параграфы) при анализе коэффициентов корреляции  $R(foF2)$ , отношения  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$  и стандартного отклонения высоты слоя  $F2$ ,  $hmF2$ .

В силу выбора моментов, взятых для сравнения  $foF2$  (см. выше), естественно считать, что разброса  $S$  отношения  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  отражает поведение вертикального дрейфа, индуцированного горизонтальными ветрами в термосфере. Данилов и Ванина-Дарт [27] интерпретировали полученные результаты следующим образом. После граничной даты систематически изменяется ветровой режим в термосфере. Это изменение может, в принципе, происходить несколькими способами. Возможно систематическое увеличение скорости ветра. Возможно ее систематическое уменьшение. Возможно усиление изменчивости ветра – увеличение числа переходов от данного направления к противоположному. Во всех этих случаях величина  $S$  должна возрастать.

Полученный результат подтверждает выводы, полученные на основании анализа изменчивости высоты слоя  $F2$  (см. выше параграф 4). В большинстве случаев параметр  $S(hmF2)$ , представляющий собой меру этой изменчивости, увеличивался в 1.5 - 2 раза при переходе от 50 - 60-х годов к 90-м.

## 6. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ $hmF2$ И $foF2$ ПОСЛЕ ЗАХОДА СОЛНЦА

Метод анализа долговременных изменений отношения  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  был тот же, что и метод, использованный при анализе трендов других параметров слоя  $F2$  (см. выше). Средние величины анализируемого отношения рассчитывались для двух периодов каждого года: января-февраля и июня-июля. Затем по данным для периода с начала наблюдений (обычно около 1958 г.) и до 1979 г. строилась зависимость величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от индекса солнечной активности  $F(10.7)$ . Обращает на себя внимание тот факт, что характер полученной зависимости  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от индекса  $F(10.7)$  различен зимой и летом. Зимой указанное отношение растет с увеличением солнечной активности, а летом – падает. Обратный эффект был обнаружен автором [11, 12] при анализе отношения  $foF2(02)/foF2(14)$  – там наблюдалось падение  $foF2(02)/foF2(14)$  с ростом  $F(10.7)$  зимой и рост – летом. Эффект разной зависимости отношений  $foF2$  в разные моменты местного времени от солнечной активности был обнаружен нами, по-видимому, впервые и еще ждет своего объяснения, которое выходит за рамки данной статьи.

Полученная аппроксимация зависимости  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  от  $F(10.7)$  для каждой станции использовалась для получения величины  $\Delta[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$ , которая представляет собой разность между наблюдаемой величиной указанного отношения и ее модельным (аппроксимация) значением. Как и в предыдущих случаях, анализ долговременных изменений отношения  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  проводился с помощью величины  $\Delta[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$ .

Использовались два метода выделения тренда. В первом из них (использованном во всех предыдущих работах по анализу трендов  $foF2(02)/foF2(14)$ ) рассматривалась зависимость от времени непосредственно величин  $\Delta[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$ , полученных описанным выше способом. Пример использования такого подхода приведен на рис. 9 для станций Иркутск и Москва.

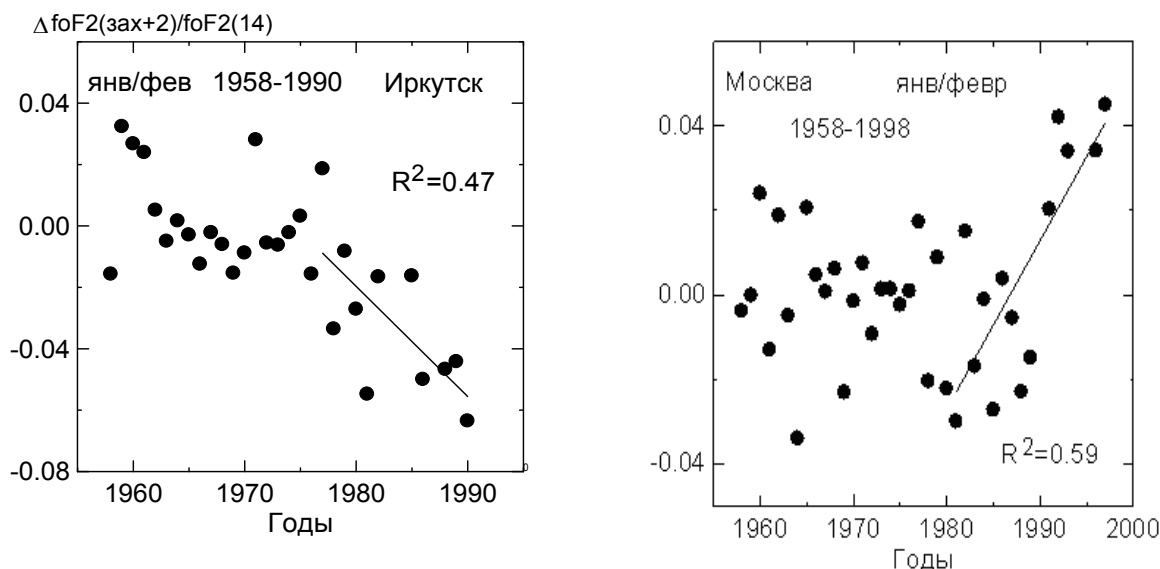


Рис. 9. Зависимость величины  $\Delta[foF2(зах+2)/foF2(14)]$  от времени для станций Иркутск и Москва.

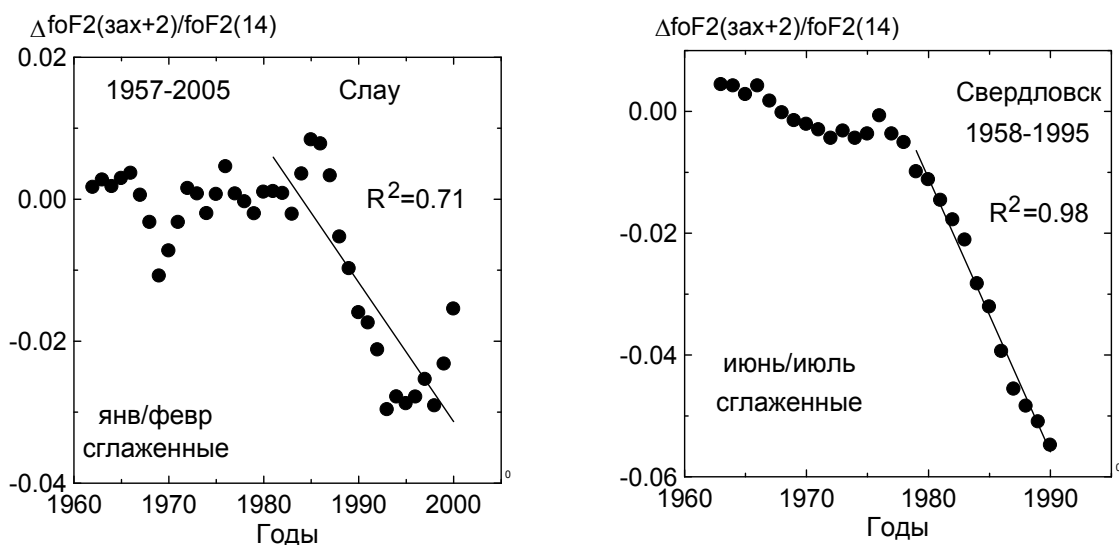


Рис. 10. Зависимость величины  $\Delta[foF2(зах+2)/foF2(14)]$  от времени для станций Слау и Свердловск

Рисунок 9 дает примеры относительно хорошо выраженного тренда величины  $\Delta[foF2(зах+2)/foF2(14)]$  после примерно 1980 г. Видно, что этот тренд отрицателен в случае Иркутска и положителен в случае Москвы, хотя рассматривается один и тот же сезон (январь-февраль). Величины  $R^2$  достаточно велики и при имеющемся количестве точек обеспечивают статистическую значимость аппроксимации после граничной даты не менее 95%. Однако, в ряде случаев разброс точек на рисунках типа рис. 9 значительно сильнее. В этом случае был применен метод, использованный при поисках трендов стандартных отклонений величин  $foF2(зах+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(зах+2)$  [15, 27]. Он состоит в том, что сначала вычисляются скользящие средние величины  $\Delta[foF2(зах+2)/foF2(14)]$  за 11 лет (которые относятся к середине 11-летнего интервала) и рассматривается поведение со временем уже этих величин со временем. Примеры применения этого метода приведены на рис. 10 для станций Слау и Свердловск.

Каждый из двух описанных методов имеет свои преимущества и недостатки. Метод сглаживания в большинстве случаев резко уменьшает разброс точек (что легко

видеть из сравнения рис. 9 и 10) и хорошо (с высокими величинами  $R^2$ ) выявляет тенденцию (тренд) изменения  $\Delta[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$  после граничной даты. Однако этот метод по очевидным причинам укорачивает имеющийся ряд точек на 5 лет с каждого конца, поэтому его нецелесообразно применять для станций, данные которых в банках ионосферных данных кончаются достаточно рано (например, в 1990 году и ранее), ибо в этом случае остается мало точек после граничной даты для построения надежного тренда. Кроме того, наличие одной ошибочной точки с очень большим отличием от остальных (такие точки встречаются и связаны, очевидно, с ошибками при обработке ионограмм, или, что более вероятно, с опечатками при заполнении банка данных) может существенно исказить картину реального тренда. При использовании первого метода такие точки хорошо видны и просто исключаются из рассмотрения волевым образом (см. обсуждение этого вопроса в работе [11]).

Таким образом, используя оба метода и выбирая наиболее надежные величины наклона  $k$  аппроксимирующей линии на рисунках типа рис. 9 и 10, мы получили тренды (величины  $k$ ) для всех проанализированных ионосферных станций. Подчеркнем, что в использованном подходе есть элемент субъективизма, однако мы надеемся, что (даже при возможном наличии отдельных ошибок в определении  $k$ ) в целом мы получаем достоверную картину трендов величины  $\Delta[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$ .

Таблица 3

Тренды  $foF2(\text{зах}+2)$ ,  $hmF2$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$  для различных станций

Станция	Тренд $foF2(\text{зах}+2)$		Тренд $hmF2(\text{зах}+2)$		Тренд $hmF2$	
	янв/фев	июнь/июль	янв/фев	июнь/июль	Данилов [2006]	Бремер [1998]
Ашхабад	-42	+17	-2.3	+1.3	+0.64	+0.73
Боулдер	+06	-06	-1.0	-1.6	+0.41	
Вакканаи	+30	-32	-0.6	-1.1		
Дурбес	0	+21				-0.02
Иркутск	-24	-06	+0.7	+0.6		
Калининград	-11	-14	-0.7	-1.6		+0.16
Канберра	+05	-05			+0.08	
Москва	+26	+43	+2.3	+1.6	+0.57	+0.84
Оттава	+05	+20				
Пуатье	-19	+21			-0.38	-0.42
Рим	-07	+09				-0.26
Свердловск	+33	-45	+1.3	+0.3	+0.53	+0.44
Слау	-20	+10	+0.5	+0.3		+0.29
Таунсвилль	-20	+05				
Ташкент	+18	-44	+0.3	-2.0		+0.14
Томск	+27	-22	+0.9	+0.6	+0.24	
Хабаровск	+24	+19	+0.5	-0.4	+0.35	
Хобарт	+24	+21	+1.1	+1.8		
Чанг-Ли	+22	+03	+0.4	-0.9		
Юлиусру	-08	-03	-1.6	-0.5	-0.25	-0.19

Полученные тренды величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  (наклон  $k$  линейной аппроксимации после граничной даты на рисунках типа рис. 9 и 10) для всех проанализированных станций представлены в табл. 3 в единицах  $10^{-4}$ . Как показывает табл. 3, тренды величины  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  существенно различаются для разных станций и могут быть как положительными, так и отрицательными. Мы вернемся к этому вопросу ниже при обсуждении связи между трендами  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$ .



Результаты этого и предыдущих параграфов прямо указывают на изменение ветрового режима термосферы после «граничной даты». Поскольку ветровой режим влияет на  $foF2$  через индуцированный дрейф и соответствующее изменение высоты слоя, естественно ожидать, что должны происходить изменения и в самой величине  $hmF2$ .

Был проведен [29] анализ величин  $hmF2$  для момента  $T$  (зах+2 ч), который уже обсуждался выше (пробные расчеты были выполнены также, как и в предыдущем случае, для момента  $T$ (зах+1 ч). Рассматривались абсолютные величины  $hmF2$ , рассчитанные из величин  $foF2$  и  $M3000$ , приводимых в банках данных, методом Шимазаки [30]. Анализ удалось провести лишь для ряда среднеширотных станций (высокоширотные и приэкваториальные станции не рассматривались по причинам, приводившимся выше). Данные по  $hmF2$  значительно хуже представлены в международных банках данных (встречаются неправильный формат, пропуски целых периодов и т. д.), поэтому выбор станций, покрывающих непрерывными данными весь интересующий нас период с 1958 г. по вторую половину 90-х годов, невелик.

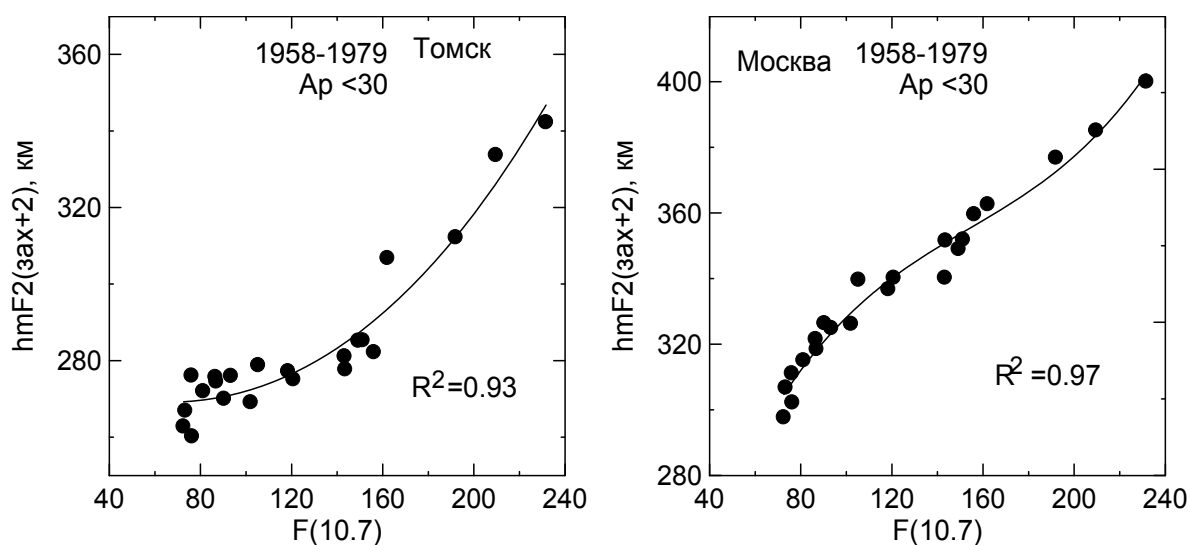


Рис. 11. Зависимость величины  $hmF2(зах+2)$  от солнечной активности для Томска (январь-февраль) и Москвы (июнь-июль).

Анализ проводился тем же методом, что и для других параметров слоя  $F2$ , описанных выше. Строилась зависимость величины  $hmF2(зах+2)$  от  $F(10.7)$  (примеры приведены на рис. 11) и анализировался временной ход сглаженной за 11-и летние периоды величины  $\Delta hmF2(зах+2)$  для двух периодов года – январь-февраль и июнь-июль.

Примеры полученных зависимостей от времени величины  $\Delta hmF2(зах+2)$  приведены на рис. 12 и 13. Как видно из этих рисунков, наблюдается, как и в случае других параметров слоя  $F2$ , рассмотренных выше, хорошо выраженный систематический ход со временем после «граничной даты». Итог рассмотрения этого хода (наклон аппроксимирующей линии  $k$  после 1980 г.) для всех проанализированных станций приведен в табл. 3. [31]

Легко видеть, что использованный метод аналогичен методу, неоднократно использовавшемуся для поисков трендов  $hmF2$  (см, например, [19]). Отличие (но очень важное!) состоит лишь в том, что ранее брались величины  $hmF2$  для фиксированных моментов  $LT$  и данные усреднялись по суткам и месяцам года. В данном же случае рассматривается не формальный момент времени (о котором природа ничего не знает), а момент, связанный с конкретным физическим процессом – заходом Солнца. Кроме того, летние и зимние данные рассматривались отдельно. Как видно из рис. 12 и 13 и табл. 3, во

всех случаях наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый тренд  $hmF2$  после «граничной даты».

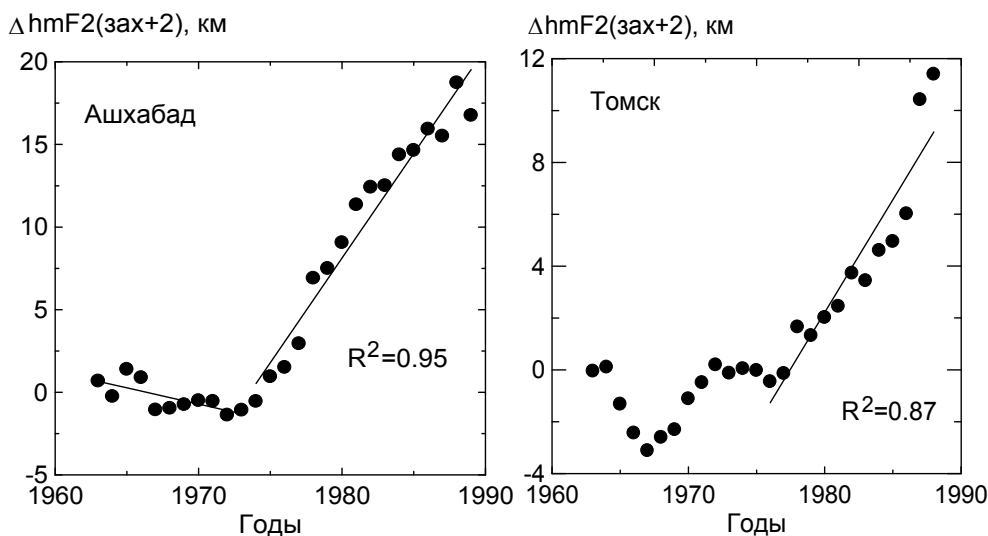


Рис. 12. Зависимость величины  $hmF2(зах+2)$  от времени для станций Ашхабад (июнь-июль) и Томск (январь-февраль).

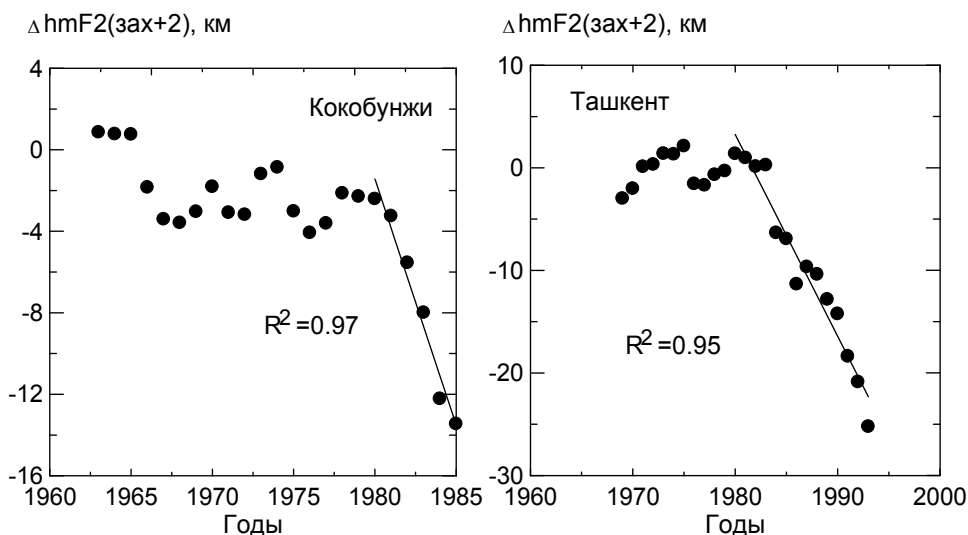


Рис. 13. Зависимость величины  $hmF2(зах+2)$  от времени в июне-июле для станций Кокобунжи и Ташкент.

Видно также, что наблюдаются как положительные (рост  $hmF2(зах+2)$ ), так и отрицательные (падение  $hmF2(зах+2)$ ) тренды. Мы обсудим этот факт ниже в следующем параграфе. Здесь приведем лишь статистику результатов, показанных в табл. 3.

Не обнаружено закономерности в географическом распределении положительных и отрицательных трендов. Для 12 станций из 15 знаки трендов в январе-феврале и июне-июле одинаковы. Летом число положительных и отрицательных трендов примерно одинаково (7 и 7). Зимой слегка преобладают положительные тренды (10 из 14).

Итак, мы получили долговременные вариации двух параметров слоя  $F2$ , отношения критических частот  $foF2(зах+2)/foF2(14)$  и высоты  $hmF2(зах+2)$ . Отправной точкой наших рассуждений был тот факт, что величина  $foF2(зах+2)$  наиболее чувствительна к возможным изменениям горизонтальных ветров в термосфере. Усиление, или ослабление горизонтального ветра через индуцированный им вертикальный дрейф поднимает, или

опускает максимум слоя  $F2$  в область более слабой, или более сильной рекомбинации и тем самым влияет на величину  $Ne(\max)$ , т.е. на  $foF2$ . Если наша посылка верна, то между полученными трендами величин  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$  должна наблюдаться прямая зависимость.

Для проверки этого мы построили рис. 14а и 14б (для января-февраля и июня-июля, соответственно), где нанесли тренды  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$  для каждого года. При построении этих рисунков данные для ст. Хобарт (южное полушарие) были взяты в соответствии с сезоном. Рис. 14а и 14б показывают, во-первых, что есть значительный разброс точек относительно аппроксимирующей линии. Это неизбежно в силу целого ряда причин, в том числе и в силу наличия некоего произвола при окончательном определении величин  $k$  для  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$ . Сами исходные ионосферные данные по  $foF2$  и  $M3000$  не свободны от ошибок (см. обсуждение этой проблемы в работе [11]). Наконец, не очевидно, что изменения  $hmF2$  и  $foF2$  связаны линейно – скорее всего, эта связь достаточно сложна. Одним словом, тот факт, что зависимость двух трендов все-таки проявилась для обоих рассмотренных периодов года и оказалась статистически значимой на уровне 90-95% по критерию Фишера, представляется скорее удивительным, чем обязательным.

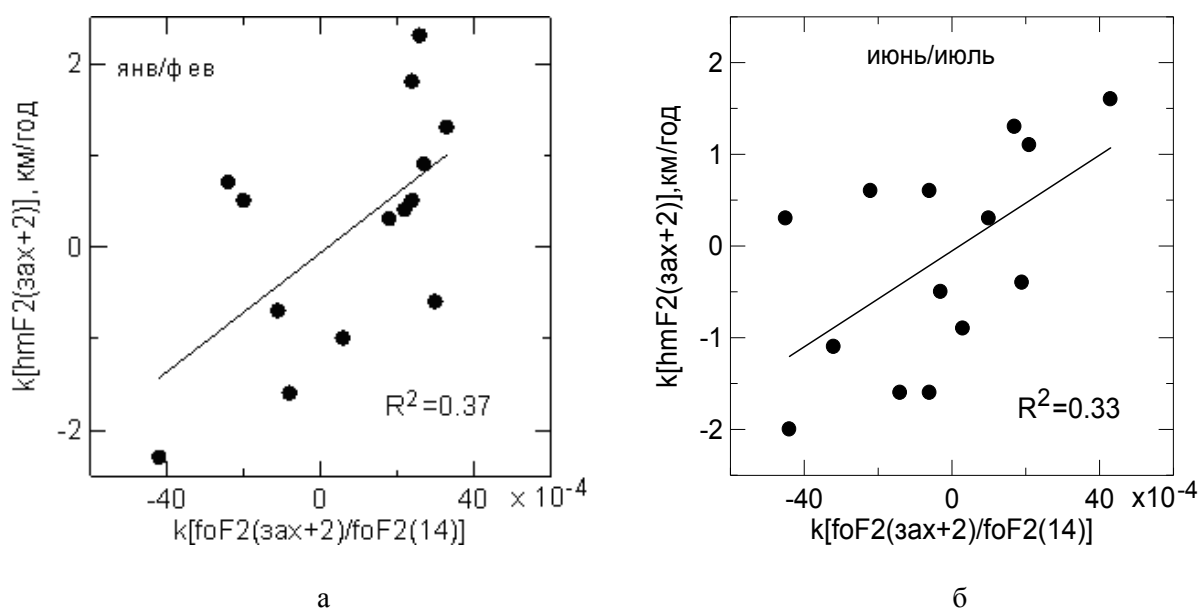


Рис. 14. Сравнение величин трендов  $k$  параметров  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$ .

Тем не менее, эта зависимость существует и, прежде всего, показывает, что наша исходная посылка об изменении  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  через изменение  $hmF2(\text{зах}+2)$  при изменении горизонтального ветра верна. Она также является косвенным подтверждением того, что величины тренда  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$ , полученные описанным выше методом, в целом правильны.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, анализ временных вариаций нескольких параметров, основанных на характеристиках ионосферного слоя  $F2$  ( $R(foF2)$ ,  $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$ ,  $S(hmF2)$ ,  $foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)$  и  $hmF2(\text{зах}+2)$ ), показывает, что после некоторой «граничной даты» (1980 г. плюс-минус 2 – 3 года) наблюдается систематическое изменение (тренд) этих параметров со временем.

Все параметры выбраны так, что согласно современным представлениям о физике слоя  $F2$  эти параметры должны быть чувствительны к изменениям вертикального дрейфа, который в средних широтах индуцируется горизонтальными термосферными ветрами. Тот факт, что все рассмотренные параметры дают статистически значимые тренды после «граничной даты», указывает на систематическое изменение ветрового режима термосферы после этой даты. Анализ различных характеристик позволяет получить разную информацию о возможных трендах термосферных ветров. Одни данные (изменения  $R(foF2)(\text{мин})$ ) указывают на усиление меридионального ветра к полюсу, другие ( $foF2(\text{ночь})/foF2(\text{день})$ ) – на усиление зонального ветра к востоку. Данные по  $S(hmF2)$  и  $S[foF2(\text{зах}+2)/foF2(14)]$  позволяют лишь утверждать, что после примерно 1980 г. резко возросла изменчивость горизонтального ветра. Данные по  $hmF2(\text{зах}+2)$  показывают, что характер (и знак) трендов термосферных ветров может быть различен в разных географических областях.

Неизбежен вопрос о том, почему систематические изменения всех проанализированных параметров начинаются около 1980 г. Приходится признать, что ответа на этот вопрос у нас пока нет. Однако, следует отметить, что в различных публикациях встречаются указания на изменения параметров ионосферы и термосферы, начиная с 70-х годов. В [32] было обнаружено систематические изменения параметров термосферных ветров в течение предыдущих десятилетий на основе измерений прибором WINDII. В [9] нашли изменения в преобладающем ветре в 80-е годы. Михайлов [33] нашел, что после примерно 1972 г. (в отличие от 40 - 60-х годов) изменение со временем  $hmF2$  нельзя описать долговременными вариациями геомагнитной активности. Михайлов [33] объяснил изменение в поведении со временем величины  $hmF2$  ростом количества парниковых газов в атмосфере. В [34] было обнаружено изменения трендов ионосферных слоев  $F1$  и  $E$  около 1979 г. Стоит напомнить также, что заметное уменьшение количества стратосферного озона (включая весеннее понижение в Антарктике) началось в начале 80-х годов.

Остановимся подробнее на результатах анализа  $hmF2(\text{зах}+2)$ , описанных в параграфе 6. Один из результатов состоит в том, что получены тренды  $hmF2$  разного знака для разных ионосферных станций. На первый взгляд, неизбежно предположение, что в разных географических областях изменения ветров могут происходить в противоположном направлении. Однако следует помнить, что величина  $hmF2(\text{зах}+2)$  реагирует на изменение вертикального дрейфа плазмы в слое  $F2$ , индуцированного горизонтальными ветрами. Но изменения зонального и меридионального ветра могут происходить в результате изменений в термосферной циркуляции, вызванных охлаждением и оседанием верхней атмосферы (см. выше), по-разному. Влияние этих изменений на скорость вертикального дрейфа также различно и зависит от магнитного склонения  $D$  и наклонения  $I$  в данной географической точке. Поэтому очевидно, что эффекты дрейфа разного знака в разных пунктах (на разных станциях) могут возникать при изменении как зонального, так и вертикального ветра в одну и ту же сторону на всех станциях. Иначе говоря, разные знаки трендов  $hmF2(\text{зах}+2)$  не требуют обязательного предположения о «пятнистом» характере трендов каждой компоненты горизонтального термосферного ветра. «Пятнистая» структура трендов  $hmF2(\text{зах}+2)$  может отражать различное соотношение вклада трендов меридионального и зонального ветра в точках с разными величинами  $D$  и  $I$ .

Тот факт, что тренды  $hmF2(\text{зах}+2)$  имеют разные знаки для разных станций и даже в разные сезоны (см. параграф 6), позволяет понять, почему при применявшихся ранее подходах [2, 19, 25, 26] не удалось получить ясной и достоверной картины трендов  $hmF2$ .

Тем не менее, целесообразно сравнить тренды  $hmF2(\text{зах}+2)$ , полученные в данной работе, с трендами  $hmF2$ , полученными ранее Бремером [19] и автором [2]. Такое сравнение представлено в Таблице 4. Видно, что тренды, полученные в данной работе, систематически больше трендов, полученных при использовании фиксированных

моментов LT. Это является еще одним аргументом в пользу того, что тренды *hmF2* вызываются изменением динамических процессов, поэтому правильно искать их не для фиксированных моментов LT, а для моментов, связанных с естественным процессом – заходом Солнца.

Стоит обратить внимание и на тот факт, что для станций Москва, Свердловск и Слау в данной работе получены положительные тренды для обоих сезонов. И для этих станций тренды, полученные в [2, 19] также положительны. Аналогичная картина наблюдается и для станции Юлиусру, для которой оба тренда, полученные в данной работе, и тренды полученные в двух цитируемых работах, отрицательны. Однако, число станций, для которых имеются определения трендов во всех трех работах, слишком мало для того, чтобы проводить детальное сравнение. Кроме того, сезонные различия в трендах *hmF2*(зах+2), найденные в данной работе для ряда станций, затрудняют сравнение этих трендов с трендами *hmF2*, полученными в более ранних работах.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ долговременных изменений (трендов) ряда параметров ионосферного слоя *F2* показывает, что в поведении со временем всех этих параметров наблюдается резкое изменение в период около 1980 г. (названного автором ранее «граничной датой»). Рассмотрены те параметры, которые по современным представлениям должны быть чувствительны к изменениям динамического режима (горизонтальных ветров) термосферы.

Полученный результат показывает, что динамический режим термосферы также меняется (что представляется неизбежным) с изменением общего состояния атмосферы – охлаждением и оседанием средней и верхней атмосферы из-за увеличения количества парниковых газов [3, 4]. Одновременно полученные в более ранних работах автора и в данной работе результаты показывают, как измерения ионосферных параметров (которые имеются за значительно более долгий период, чем измерения ветра в термосфере) могут быть использованы для анализа общей ситуации с трендами в термосферной динамике и конкретных ее характеристик – скоростей меридионального и зонального ветра.

Обнаружен факт, что тренды высоты слоя *F2* лучше выражены и больше по абсолютной величине, если их определять не для фиксированных моментов местного времени, как это делалось до сих пор, а для момента, привязанного к естественному процессу – заходу Солнца. Это объясняет причины неудач с поисками трендов *hmF2* в ряде более ранних работ различных авторов. Кроме того, указанный факт говорит о том, что причину трендов *hmF2* надо связывать с трендами ветрового режима термосферы. Видимо, бессмысленно искать их связь с аэрономическими параметрами (концентрацией атомного кислорода, коэффициентом рекомбинации, и т. д.). Ветровая природа трендов *hmF2* позволяет понять разные знаки трендов для разных станций, полученные в данной работе и получавшиеся всеми исследователями, пытавшимися определить тренды *hmF2* ранее. Различие в знаках трендов *hmF2* связано, очевидно, с разным вкладом трендов зонального и меридионального ветра в пунктах с разными величинами магнитного склонения *D* и наклонения *I*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laštovička J. et al. Long-term trends in foF2: a comparison of various methods. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006.V. 68. P. 1854.
2. Danilov A. D. Progress in studies of the trends in the ionosphere F region // Physics and Chemistry of the Earth (C) 2006.V. 31. P. 34.

3. Laštovička J. et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. No. 5. P. 1255.
4. Laštovička J. Long-term trends in the upper atmosphere – recent progress, Paper presented at the 11<sup>th</sup> Assembly of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (Sopron, Hungary, 23-30 August 2009).
5. Jacobi Ch., Lange M., Kurschner D., Manson A. H., and Meek C. E. A long-term comparison of Saskatoon MF radar and Collm LFD mesosphere-lower thermosphere wind measurements // *Phys. Chem. Earth* 2001. V. 26. P. 419.
6. Jacobi Ch., Portnyagin Yu. I., Merzlyakov E. G., Solovjova T. V., Makarov N. A., and Kurschner D. A long-term comparison of mesopause region wind measurements over Eastern and Central Europe // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. P. 227.
7. Bremer J., Schminder R., Greisiger K. M., Hoffmann P., Kurschner D., and Singer W. Solar cycle dependence and long-term trends in the wind field of the mesosphere/lower thermosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59. P. 497.
8. Merzlyakov E., Jacobi Ch., Solovjova T. V., Portnyagin Yu. I. Structural changes in trends of MLT winds at middle and high latitudes. Paper presented at 5<sup>th</sup> IAGA/ICMA/CAWSES Workshop “Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere”, St. Petersburg (Russia), September 9-3, 2008.
9. Portnyagin Yu. I., Merzlyakov E. G., Sokolova T. V., Jacobi T. V., Kurschner D., Manson A., and Meek C. Long-term trends and year-to-year variability of midlatitude mesosphere/lower thermosphere winds // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 1890.
10. Keuer D., Hoffmann P., Singer W., Bremer J. Long-Term variations of the mesospheric wind field at middle latitudes // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1779.
11. Данилов А. Д., Временные и пространственные вариации отношения ночных и дневных величин критических частот слоя F2 // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47. No. 6, С. 751.
12. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б. Долговременные тренды отношения дневных и ночных величин foF2 // *Геомагнетизм и аэронавигация*. Т. 47. 2007. No. 2, С. 236.
13. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б., Пространственные и временные вариации отношения foF2(ночь)/foF2(день): уточнение ряда эффектов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48. No. 2, С. 228.
14. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б., Критические частоты foF2 как индикатор трендов термосферной динамики // *Геомагнетизм и аэронавигация*. Т. 48. 2008. No. 6, С. 810.
15. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б., Разброс величин hmF2 как индикатор трендов термосферной динамики // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2009. Т. 49. No. 1. С. 58.
16. Danilov A. D. Critical frequencies foF2 as an indicator of trends in thermospheric dynamics // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 1430.
17. Danilov A. D. Time and spatial variations of the foF2(night)/foF2(day) values. // *Adv Space Res.* V. 43. P. 1786. 2009.
18. Danilov A. D. Scatter of hmF2 values as an indicator of trends in thermospheric dynamics. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 1586.
19. Bremer J. Trends over the ionospheric E and F regions over Europe // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16. P. 986.
20. Ванина Л. Б., Данилов А. Д. Связь дневных и ночных величин критической частоты области F2 // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2006. Т. 46. No. 2. С. 219.
21. Danilov A. D. Relation between daytime and night-time values of the critical frequency fof2 // *intern. J. Geomagn. Aeron.* 2006. V. 6. No. 3, doi: 10.1029/2005gi000129.
22. Danilov A. D. Long-term trends in the relation between daytime and nighttime values of foF2 // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. No. 5. P. 1199.
23. Danilov A. D. Time and spatial variations in the ratio of nighttime and daytime critical frequencies of the F2 layer // 2008. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P.1201.
24. Danilov A. D. Trends of parameters of the ionospheric F2 layer as an indicator of trends in thermospheric winds. In: *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere - IAGA SpringerBook*, 2010.
25. Ulich T., Turunen E., Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionospheric data. // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. No. 9. P. 1103.
26. Marin D., Mikhailov A. V., de la Morena B. A., Herraiz M. Long-term hmF2 trends in the Eurasian longitudinal sector on the ground-based ionospheric observations // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 761.

27. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б., Сравнение величин  $foF2$  в дневное время и после захода Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. No.1..С. 61.
28. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2 layer. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1385.
29. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б. Тренды параметров ионосферного слоя  $F2$  как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. no. 2. С. 195.
30. Shimazaki T., World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric  $F2$  layer // J. Radio Res. Labs. (Japan). 1995. V. 2. P. 85.
31. Данилов А. Д., Ванина-Дарт Л. Б. Поведение  $foF2$  и  $hmF2$  после захода Солнца. Геомагнетизм и аэрономия, Т. 50. No. 6. С. 2010.
32. Emmert J. T., Fejer B. G., Fesen C. D., Sheperd G. G., and Solheim B.H. Climatology of middle- and low-latitude daytime F-region disturbance in neutral wind measured by Wind Imaging Interferometer (WINDII) // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. 24. P. 701.
33. Mikhailov A. V. Ionospheric long-term trends: If the geomagnetic control and the greenhouse hypotheses can be reconciled? // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 2533.
34. Bremer J. Long-term trends in ionospheric E and F1 regions. Paper presented at the 4<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Sodankyla (Finland), 2--8 September 2006.

## **Исследование долговременных трендов геوليوгеофизических факторов методом кумулятивных индексов**

А. А. Нусинов

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: nusinov@mail.ru*

Предложено использовать для исследования долговременных трендов различных геوليوгеофизических факторов, испытывающих вариации, связанные с циклическими изменениями солнечной активности кумулятивные индексы, применяющихся при анализе макроэкономических процессов. Показано, что для периода 1957 - 2004 гг. тренды интенсивности ультрафиолетового излучения в линии Лайман-альфа (восстановленной по ионосферным данным) практически отсутствуют.

Ключевые слова: Солнце, циклические вариации, тренды, эконометрика.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Исследования изменений климата показывают, что солнечная активность оказывает на него значительное влияние (см., например, [1] и цитируемую там литературу). Изучение современного процесса глобального потепления приводит к альтернативным заключениям: наблюдаемое изменение климата либо связано с антропогенным влиянием на атмосферу Земли, либо с рядом факторов космического происхождения - прежде всего, изменением светимости Солнца в течение последнего столетия или двух столетий.

Вопрос о росте потоков излучения Солнца и дальнейшей эволюции уровня солнечной активности достаточно противоречив. Согласно [2], наложение 90 - го и 210 - го циклов солнечной активности должно привести после 2000 года к дальнейшему росту активности и, соответственно, росту температуры атмосферы. С другой стороны, изучение поведения солнечной активности в последнее время приводит к выводу о том, что влияние векового цикла приведет к снижению уровня солнечной активности, по крайней мере, в 3 - х последующих солнечных циклах. В частности, прогнозируемые значения чисел Вольфа составляют – 85 - 95 [3; 4]. При этом правило Гневывшева–Оля, нарушенное в 22 – м – 23 - ем циклах активности, возможно, должно быть нарушено и в 24 – 25 циклах [3].

Проведенный в работе [5] анализ длиннопериодных вариаций солнечной активности, основанный на рядах данных, полученных исходя из дендрохронологических исследований радиоуглеродным методом за последние 4500 лет, а также на анализе авроральных явлений за 1700 лет, позволил выявить периоды вариаций около 100 и 200 лет, наиболее вероятно связанные с уровнем солнечной активности.

Становится очевидной необходимость прямого исследования трендов не только индексов активности, но и потоков солнечного излучения. Трудности выявления трендов полного потока связаны с тем, что масштабы многолетних изменений солнечного излучения в видимой области невелики (~ 0.1%) и обнаружение их трендов в современных экспериментах проблематично вследствие того, что вариации практически лежат в пределах погрешности аппаратуры. Ярче всего тренды должны быть выражены в



наиболее изменчивой коротковолновой части спектра. При анализе трендов излучения в этой области необходимо изучение длительных временных рядов. Из-за поглощения крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) в верхней атмосфере, эти данные могут быть получены только при внеатмосферных измерениях, начатых сравнительно недавно. К настоящему времени существует большое количество измерений КУФ на ракетах и спутниках. Однако формирование на их основе длительных рядов затруднено вследствие различий измерительных приборов, методов их калибровки и условий измерений. В то же время, представляется сомнительным выявление трендов на слишком коротких временных интервалах - близких по длительности к солнечному циклу.

Выявление долгопериодных трендов циклически изменяющихся гелиогеофизических факторов дополнительно затруднено тем, что при использовании данных за несколько солнечных циклов, различие амплитуд циклов и выбор начального момента исследуемого временного ряда могут сильно влиять не только на величину, но и на знак полученного линейного тренда. При наличии большого числа членов ряда такие противоречивые результаты формально оказываются статистически значимыми. Например, в работе [6] знак тренда критических частот ионосферы оказывается различным для различных ионосферных станций.

Для преодоления указанных выше трудностей в данной работе предложен метод, ранее не использовавшийся при выявлении трендов в различных явлениях солнечно-земной физики, основанный на использовании так называемых кумулятивных кривых Лоренца. Будут изложены основы метода и с его помощью будет выполнен анализ таких “традиционных” индексов солнечной активности как числа солнечных пятен  $W$  и поток  $F_{10.7}$  солнечного излучения на волне 10 см, а также проанализирован “эквивалентный поток” солнечного излучения в крайней ультрафиолетовой области – линии  $L_{\alpha}$ , полученный исходя из ионосферных данных.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Кумулятивное преобразование было первоначально введено М. Лоренцом [7] для описания распределения доли национального богатства среди различных групп населения. Впоследствии оно получило широкое применение при решении социально-экономических проблем (см., например, [8]), и лишь совсем недавно стало использоваться при анализе процессов в атмосфере [9].

Кривая Лоренца представляет собой графическое изображение кумулятивного распределения, определяемого следующим образом. Если  $v_i$  представляет собой  $i$ -ю величину ранжированного ряда из  $Z$  величин ( $v_i \geq v_{i-1}$ ), то при замене переменной

$$v_i^* = \frac{1}{v_t} \sum_{j=1}^i v_j \quad (1)$$

где  $v_t = \sum_{j=1}^Z v_j$ , кривая Лоренца получается построением величин  $v^*$  в зависимости от ранжирующего номера, деленного на  $Z$ . Очевидно, что для временных рядов при отсутствии тренда,  $v_i = v_{i-1}$ , кривая Лоренца представляет собой диагональ единичного квадрата с вершинами в начале координат и точке (1, 1). Коэффициент Джини  $G$  рассчитывается на основе кривой Лоренца как отношение площадей области между кривой Лоренца и диагональю треугольника, заключенного между осями координат и диагональю, к площади этого треугольника. Значение  $G$  находится в пределах от 0 до 1. В макроэкономике индекс Джини характеризует, например, неравномерность распределения доходов между различными группами населения. В этом случае кривая Лоренца является выпуклой вниз и проходит под диагональю единичного квадрата. В случае равного распределения каждая группа населения имеет доход, пропорциональный своей

численности. Чем больше отклонение кривой Лоренца от диагонали (т.е. чем больше значение  $G$ ), тем больше степень неравенства.

Помимо индексов Джини, для ранжированной кривой Лоренца можно также ввести показатель неравномерности, равный длине кривой  $L$ :

$$L = \sum_{i=1}^Z \sqrt{\frac{1}{Z^2} + (v_i^* - v_{i-1}^*)^2} \quad (2)$$

Очевидно, что для монотонного изменяющегося ряда величина  $L$  изменяется от  $L = \sqrt{2}$  для равномерного кумулятивного распределения до  $L = 2$  для экстремально неравномерного (когда все изменение ряда обусловлено первым или последним значением).

Применим теперь кумулятивное преобразование для поиска трендов во временных рядах. Для наглядности исследуем свойства преобразования на примере непрерывных функций. Будем считать ряды достаточно длинными, а исследуемый интервал много большим, чем расстояние между отдельными точками. Рассмотрим сначала функцию  $f$  от времени  $x$ , возрастающую (в общем виде - немонотонно) на интервале  $(x_{min}, x_{max})$  со временем. В этом случае для функции можно выделить линейный тренд

$$y = a + bx \quad (3)$$

Определим кумулятивное преобразование  $C(x)$  как

$$C(x) = \int_{x_{min}}^x f(x)dx / \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x)dx \quad (4)$$

Очевидно, что верхняя граница для  $C(x)$  всегда равна 1. Для иллюстрации рассмотрим сначала просто линейную функцию времени (3). Для нее

$$C(x) = (ax + bx^2/2)|_{x_{min}/x_{max}}^1 \quad (5)$$

Без ограничений общности всегда можно перенести начало отсчета времени и считать  $x_{min} = 0$ . На рис. 1 приведен простейший случай кумулятивного преобразования для линейно возрастающей функции

$$y = 100 + 0,5x \quad (6a)$$

на интервале  $[0, 100]$  и линейно убывающей

$$y = 100 - 0,5x \quad (6б)$$

на этом же интервале. Модельный тренд в этих случаях приводит к росту или спаду функции на 50% в конце интервала относительно начального значения. В обоих случаях кумулятивные кривые, соответствующие линейному росту или спаду со временем, представляют собой параболы, обращенные выпуклостью вверх или вниз, соответственно для убывающей и для возрастающей во времени функций.

На рис. 1 приведена также прямая, (диагональ единичного квадрата), соответствующая отсутствию трендов ( $b = 0$ ). Ясно, что для убывающих функций кумулятивные кривые лежат выше этой диагонали, а для возрастающих – ниже.

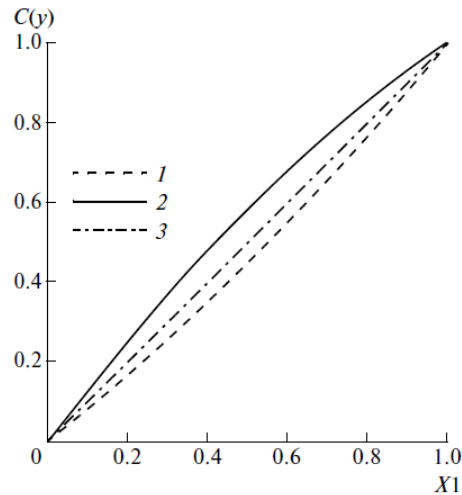


Рис. 1. Кумулятивные кривые для различных видов линейного тренда.  
1 – положительный линейный тренд; 2 – отрицательный линейный тренд;  
3 – отсутствие тренда.

Индекс Джини для непрерывного кумулятивного преобразования может быть определен как

$$G = 2 \int_0^1 (x - c(f(x))) dx \quad (7)$$

Очевидно, что при отсутствии ранжирования величина  $G$  может быть и отрицательной для убывающих во времени функции. Для функций (6), преобразования которых представлены на рис. 1, коэффициент Джини положителен,  $G = 0,0565$ , для возрастающей функции (6а) и отрицателен,  $G = -0,121$  в случае убывания (6б). Следует отметить, что при одинаковых по абсолютной величине, но противоположно направленных трендах значения  $G$  отличаются не только по знаку, но и по модулю.

### 3. МОДЕЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

При изучении трендов любых гелиогеофизических факторов временные ряды, как правило, характеризуются не только трендами с различными характерными временами, но и наличием осцилляций с достаточно сложным частотным спектром. Характерным примером может служить солнечная цикличность, наиболее заметной гармоникой которой является 11 - летний цикл.

Для оценок проявлений цикличности и трендов в преобразованных величинах можно рассмотреть в качестве модельной последовательности солнечных циклов периодические вариации, на которые наложен постоянный тренд. В простейшем случае эти изменения имеют вид:

$$y(x) = a + bx + c \sin\left(\frac{2\pi(x+TM)}{T}\right) \quad (8)$$

причем функция  $y(x)$  задана на интервале  $[0, x_m]$  и период осцилляций  $T = x_m/n \ll x_m$ . Функции вида (8) представлены на рис. 2а для значений параметров  $a = 100$ ,  $c = 100$  и двух значений  $b = 0,05$  и  $b = -0,05$  соответствующих положительному и

отрицательному трендам. Принято, что  $x \in [0, 1440]$ ,  $n = 120$  (т.е. 12 “солнечных” циклов на интервале изменения функции). Начальная фаза  $TM$  принята сначала равной нулю. Считалось также, что  $y(x) = 0$  в тех случаях, когда расчеты по (8) давали при убывающем тренде отрицательные значения.

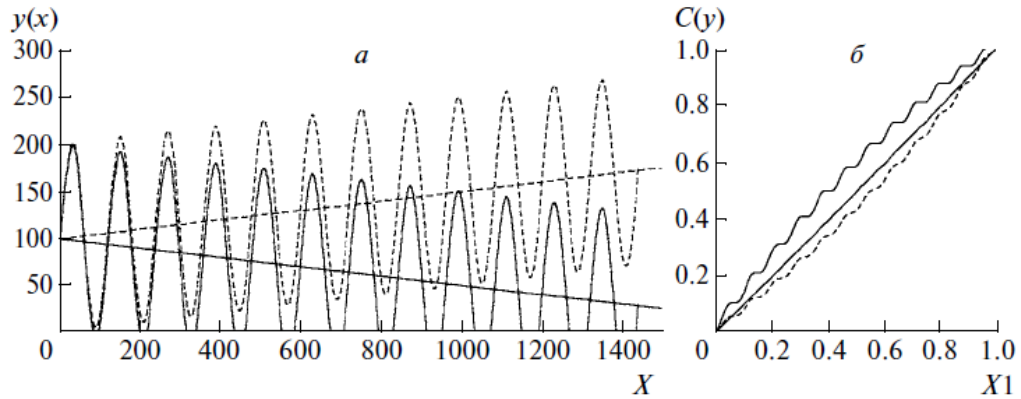


Рис. 2. *а* – Модельный солнечный цикл. Сплошная линия – тренд с убыванием, Штрих – тренд с возрастанием. *б* – кумулятивное преобразование модельного цикла. Сплошная линия – тренд с убыванием, штрих – тренд с возрастанием. Диагональ соответствует отсутствию тренда.

Две рассмотренных последовательности модельных солнечных циклов представлены на рис. 2*а*. Прямые на рисунке соответствуют линейным трендам в этих последовательностях. Кумулятивные преобразования для модельных циклов представлены на рис. 2*б*, где отрицательному тренду соответствует сплошная линия, а положительному – штриховая. Прямая на рисунке соответствует случаю, когда в (8)  $b = c = 0$ , т.е. отсутствию как осцилляций, так и трендов. Коэффициенты Джини для выбранных параметров формулы (8) составляют соответственно  $G = -0.154$  для убывающего тренда и  $G = 0.068$  для положительного тренда. Из рисунка видно, что график, соответствующий отрицательному тренду, (верхняя кривая), отстоит от диагонали квадрата значительно более заметно, чем в случае положительного тренда (нижняя штриховая кривая на рисунке). Это правило является общим при анализе знака трендов и должно учитываться при исследовании реальных временных рядов.

Необходимо отметить, что при исследовании вариаций реальных временных рядов кумулятивная кривая может неоднократно пересекать диагональ единичного квадрата, что затрудняет обнаружение тренда и единственным индикатором его наличия оказывается индекс Джини. Можно дать следующее определение: временной ряд или заданная на интервале функция в целом возрастает, (то есть характеризуется положительным трендом в области определения), если для них индекс Джини  $G$  положителен и в целом убывает (имеет отрицательный тренд), если  $G$  отрицателен.

В отсутствие трендов у модельного ряда, т.е. при  $b = 0$  в (8), осциллирующее слагаемое дает дополнительный вклад в интеграл, что приводит к возникновению артефакта: индекс Джини для осциллирующего ряда оказывается зависящим от начальной фазы и, в принципе, может быть отличным от нуля. В зависимости от начальной фазы кривые Лоренца могут находиться как выше биссектрисы единичного квадрата (формально это соответствует убыванию исследуемого ряда или моделирующей его функции), так и ниже биссектрисы, что соответствует наличию положительного тренда. Возможно также многократное пересечение биссектрисы.

Таким образом, оказывается, что наличие колебаний в исследуемом ряде может приводить к ненулевым значениям коэффициента Джини в отсутствие трендов в зависимости от начальной фазы и числа периодов исследуемого временного процесса. Грубую оценку значимости величин  $G$  можно получить исходя из расчетов для модельного ряда (8) при различных начальных фазах  $\varphi = MT$ .

Расчет зависимости коэффициентов Джини для произвольной начальной фазы показали, что от начальной фазы зависят как знак, так и абсолютная величина  $G$ . Можно взять в качестве порогового значения, позволяющего судить о наличии или отсутствии тренда максимальную абсолютную величину  $G = 0.03$ . Ниже это значение будет использовано при анализе рядов наблюдательных данных.

Коэффициент Джини зависит также и от других коэффициентов, входящих в модельный ряд (8). Это может повлиять на величину критических значений  $G$  при рассмотрении рядов конкретных физических величин. В частности, индекс  $F_{10.7}$  – солнечное радиоизлучение на волне 10.7 см изменяется в циклах солнечной активности в пределах типичных значений от  $F_{10.7} \sim 60$  до  $F_{10.7} \sim 220$ . В отсутствие трендов эти величины соответствуют в модельном ряде (8) значениям  $a = 140$  и  $c = 80$ . Расчеты показывают, что для этого случая критическое значение  $G$  составляет около 0.015.

В дальнейшем будем говорить, что временной ряд в целом возрастает или убывает на исследуемом интервале, если для него коэффициент Джини соответственно положителен или отрицателен и превосходит по абсолютной величине заданное критическое значение.

Замечание о возникновении неправильных представлений о наличии или отсутствии тренда в зависимости от начальной фазы и числа периодов исследуемого временного процесса относится и к методу линейной регрессии, широко применяемому при исследовании временных трендов: достаточно существования “некомпенсированного” участка временного ряда для появления трендов в расчетах регрессий. Примеры возникновения таких кажущихся трендов будут рассмотрены ниже.

Перейдем теперь к рассмотрению реальных временных рядов различных индексов солнечной активности.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЕЛ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Одним из наиболее широко известных индексов солнечной активности является число пятен  $W$ . Формирование этого индекса на основе систематических наблюдений ведется с середины XVIII века, а более ранние значения получают по историческим записям и некоторым косвенным данным, например, радиоуглеродным дендрохронологическим или палеомагнитным (см., например, [10]).

На рис. 3а представлены наблюдения  $W$  начиная с 1749 г. до настоящего времени. Сплошной прямой показано уравнение линейной регрессии чисел пятен на время, а штриховая соответствует скользящему среднему за  $\sim 22$  года (261 месяц).

Как видно из рисунка, солнечная активность за весь период наблюдений систематически возрастает, уравнение линейной регрессии  $W$  на время  $t$  для исследуемого ряда имеет вид:

$$W = 0,113t - 15905 \quad (9)$$

что соответствует среднему возрастанию величины  $W$  в среднем на  $\sim 1$  за каждые 10 лет. Анализ статистических характеристик показывает, что коэффициенты уравнения (9) статистически значимы.

В то же время, рассмотрение сглаженного временного ряда (штриховая линия на рис. 3а) демонстрирует, что достаточно длительные периоды (от 3 до 6 солнечных циклов) характеризуются в основном спадом или подъемом солнечной активности.

Кривая Лоренца для исследуемого ряда представлена на рис. 3б верхней сплошной линией. Для удобства вместо единичной оси помещена также ось времени в натуральном масштабе. Видно, что кривая практически полностью находится ниже диагонали единичного квадрата (штриховая прямая), что соответствует возрастанию в целом за исследуемый период. Нижняя сплошная линия показывает разность  $\Delta$  между ординатами кривой Лоренца и ординатами точек на диагонали единичного квадрата увеличенную в 10 раз. Видно, что в начале исследуемого периода величины могут принимать положительные значения, что соответствует резкому спаду уровня солнечной активности после 4 - го солнечного цикла: (максимум 4 - го цикла соответствует  $W = 141.2$  в 1788 г., а максимум 5-го цикла  $W = 49.2$  в 1805 г.).

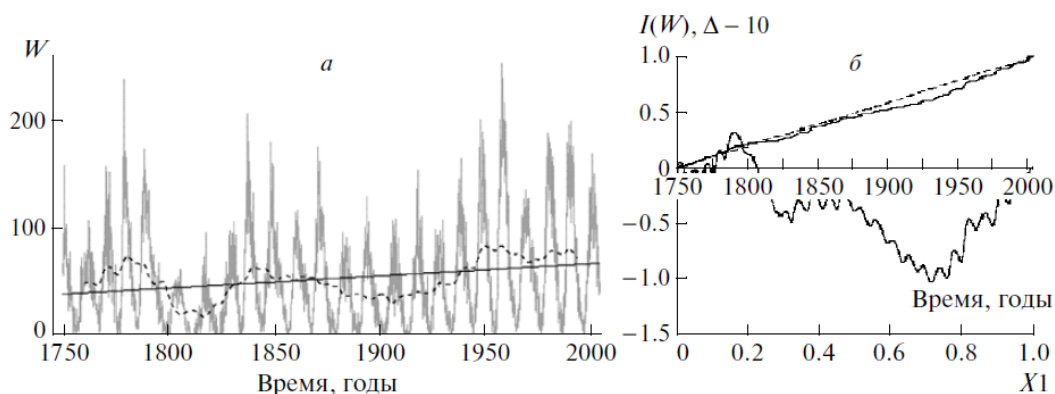


Рис. 3. а – Месячные значения чисел солнечных пятен с 1749 по 2004 гг. Сплошная прямая – линейная регрессия, штрих – скользящее среднее за 22 года.  
б – Кривая Лоренца для чисел пятен  $W$  за 1749 – 2004 гг. (верхняя сплошная линия). Нижняя сплошная линия – отклонения кривой Лоренца от диагонали единичного квадрата увеличенная в 10 раз.

Индекс Джини для кривой Лоренца, приведенной на рис. 3б, составляет  $G = 0.0908$ , что соответствует возрастанию в целом за исследуемый период и значительно превышает полученное выше критическое значение  $G_c = 0.03$ . Таким образом, весь ряд наблюдений за 1749 - 2004 гг. оказывается в целом возрастающим, причем это возрастание значимо. Перейдем теперь к анализу солнечных индексов за последние циклы активности.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 18 – м – 23 – ем СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Особый интерес представляет анализ поведения солнечной активности за последние солнечные циклы, начиная с 19 - го и заканчивая текущим, 23 - м циклом. Этот интерес обусловлен, прежде всего, тем, что после Международного геофизического года резко возросли как объем, так и количество видов геофизических и солнечных наблюдений, что связано, прежде всего, с выходом в космическое пространство и появлением новых измерительных средств. В связи с этим возникло большое количество исследований трендов различных геофизических явлений, ограниченных во времени указанным интервалом (см., например, [11; 12]). При этом для исследований часто берутся еще более короткие временные интервалы (см., например, [6; 13]). В этом разделе мы

рассмотрим солнечные индексы, начиная с периода вблизи максимума 18 - го цикла активности – момента начала измерений одного из наиболее важных солнечных индексов  $F_{10.7}$  – потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см.

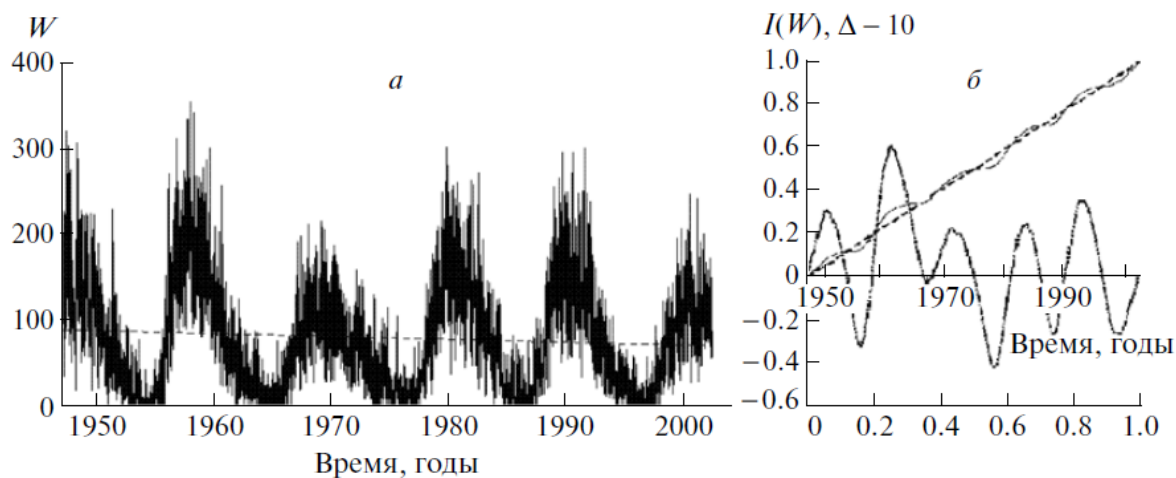


Рис. 4. Изменения чисел пятен в 18 – м – 23 - м циклах солнечной активности (а) и соответствующая кривая Лоренца (б).

Изменения со временем  $T$  числа пятен  $W$  приведены на рис. 4а. Штриховой линией представлено уравнение регрессии  $W = 757 - 0.343629101T$ , соответствующее убыванию  $W$  в среднем на 15 единиц за исследуемый интервал. Статистические оценки показывают, что коэффициенты уравнения статистически значимы, а уравнение линейной регрессии – незначимо по  $F_{11}$ -критерию Фишера. Для разрешения этого противоречия применим теперь для анализа изменений  $W$  за этот же период метод кумулятивных кривых. Соответствующая кривая Лоренца приведена на рис. 4б сплошной линией. Точечной линией обозначена увеличенная в 10 раз разность  $\Delta$  между ординатами диагонали единичного квадрата и кривой Лоренца. Видно, что хотя кривая Лоренца многократно пересекает диагональ, количество положительных полувольт у величины  $\Delta$  больше, чем отрицательных, что свидетельствует об убывании  $W$  в целом за исследуемый период. Это подтверждает расчет индекса Джини:  $G = -0.0384$  и превосходит выполненную ранее оценку критического значения  $G = 0.03$ , то есть убывание является значимым.

В принципе, отличие  $G$  от критического значения невелико и выявленное убывание может быть обусловлено некоторым сбоем цикличности вблизи 19 - го цикла активности, хорошо видимым на графике для величины  $\Delta$ . Тем не менее, можно утверждать, что современная эпоха (пять последних солнечных циклов) характеризуется в целом убыванием солнечной активности. Сопоставляя этот вывод с полученным в начале параграфа выводом о росте солнечной активности в течение последних 25 циклов, можно сделать вывод, что именно в настоящее время этот рост прекращается и в целом солнечная активность перейдет к фазе длительного спада (разумеется, при общем сохранении 11 - летней цикличности).

Проверим этот вывод на другом индексе активности – потоке солнечного радиоизлучения на волне 10 см -  $F_{10.7}$ . Временной ряд  $F_{10.7}$  содержит в себе как эпохи общего спада активности в 18 – м – 20 - м циклах, так и подъема (20 – го – 23 - го циклов). Линейный тренд для этого ряда соответствует уравнению  $F_{10.7} = 393.3 - 0.132T$ , которое формально описывает слабый спад  $F_{10.7}$  (на  $\sim 6$  солнечных единиц потока за 50 лет наблюдений). Коэффициенты регрессии оказываются статистически значимыми по критерию Стьюдента, но само уравнение также оказывается статистически незначимым



по  $F1$ - критерию Фишера, т. е на основе линейного регрессионного анализа вывод о существовании линейных трендов  $F10.7$  подтверждается по одному из статистических критерием и подтверждается по другому. Это может быть обусловлено тем, что малый линейный тренд наблюдается на фоне значительных циклических вариаций, в основном и определяющих дисперсию данных, а существование тренда не изменяет существенно дисперсию.

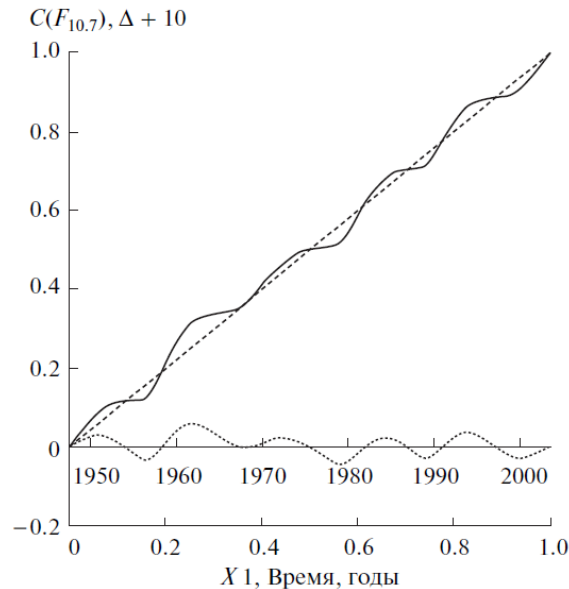


Рис. 5. Кривая Лоренца для  $F10.7$  за весь период наблюдений.

Построим теперь для выявления тренда кумулятивную кривую Лоренца для индекса  $F10.7$ . Результаты расчетов представлены на рис. 5. Штриховая прямая представляет собой биссектрису единичного квадрата, а точечная линия – увеличенная в 10 раз разность между ординатами кумулятивной кривой и биссектрисы. Из рисунка видно, что кумулятивная кривая в основном проходит выше биссектрисы, т.е. индекс  $F10.7$  в целом убывает во времени, как и числа солнечных пятен. Индекс Джини, рассчитанный для всего периода наблюдений, составил  $G = -0.0384$ . Это значение превышает по абсолютной величине ранее полученный для модельного ряда критический уровень  $G_c = 0.015$ , то есть найденное убывание  $F10.7$  оказывается значимым.

Таким образом, кумулятивные кривые Лоренца оказываются полезным инструментом, позволяющим получить дополнительные аргументы о существовании или отсутствии трендов в условиях, когда общепринятые статистические оценки оказываются ненадежными или противоречивыми. Из рис. 4 и 5 следует, что вывод о наличии или отсутствии тренда в гелиогеофизических величинах, в принципе может зависеть от выбора временного интервала для анализа. Поэтому этап проверки значимости вывода о существовании тренда, основанный на анализе модельного ряда, подобного анализируемому ряду гелиогеофизических данных следует считать обязательным.

Рассмотрим в заключение изменения модельного ряда интенсивности излучения Солнца в линии Лайман-альфа (121.6 нм), полученного с использованием данных о критических частотах - слоя ионосферы [14]. Данные об интенсивности излучения приведены на рис. 6а, а соответствующая кривая Лоренца – на рис. 6б.

Из рисунка видно, что кривая Лоренца практически совпадает с диагональю единичного квадрата, поэтому тренды ультрафиолетового излучения практически отсутствуют. Это подтверждается расчетом величины индекса Джини:  $G = 8.3 \times 10^{-4}$ , значительно меньшей критического значения.



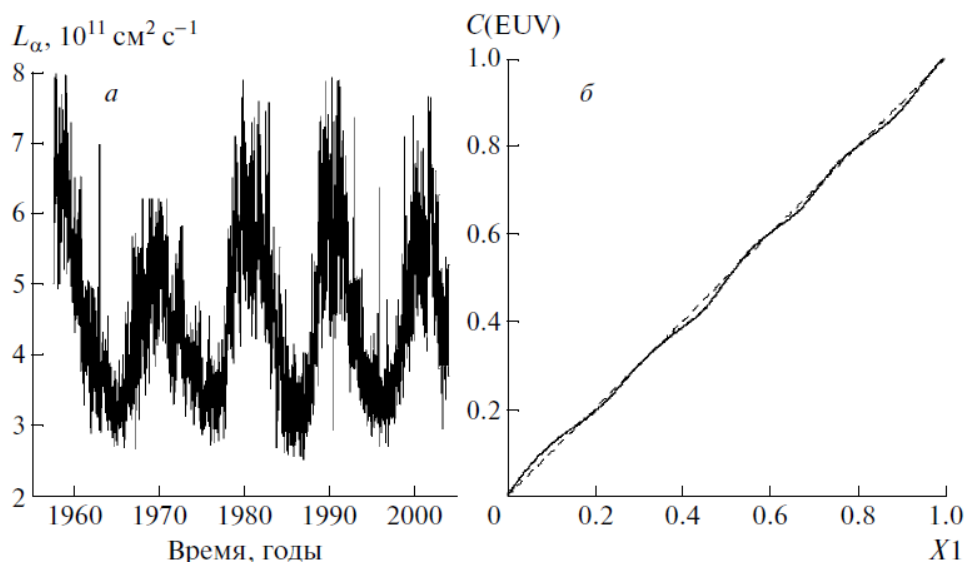


Рис. 6. Изменения ультрафиолетового излучения в линии  $L_{\alpha}$  в 19 - м - 23 - м циклах солнечной активности (а) и соответствующая им кривая Лоренца (б).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы.

1. Предложен новый подход к выявлению малых линейных трендов при анализе длинных рядов гелиогеофизических данных – метод кумулятивных кривых Лоренца. Предложенный подход позволяет избавиться от неопределенностей, связанных с использованием линейного регрессионного анализа, традиционно применяемого в задачах обнаружения и исследования трендов.

2. Преимуществом метода кумулятивных кривых являются отсутствие необходимости приведения исследуемых временных рядов к единому уровню солнечной активности с целью исключения эффекта значительных циклических вариаций – например, при исследовании трендов в ионосфере в верхней атмосфере.

3. Применение метода кумулятивных кривых к временным рядам чисел солнечных пятен и потока радиоизлучения на волне 10.7 см указывает на смену тенденции долговременных изменений солнечной активности: как числа пятен, так и радиоизлучение стали в целом убывать в течение последних пяти солнечных циклов.

4. Исследование с помощью метода кумулятивных кривых потока солнечного излучения в линии  $L_{\alpha}$  не подтверждает существование тренда ультрафиолетового излучения за последние пять солнечных циклов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкирцев В. С., Машнич Г. П. Ожидает ли нас глобальное потепление в ближайшие годы? // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 1. С. 132–135. 2003
2. Дергачев В. А., Распопов О. М. Долговременные процессы на Солнце, определяющие тенденцию изменения солнечного излучения и поверхностной земной температуры // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 3. С. 9–14. 2000.
3. Duhau S. An early prediction of maximum sunspot number in Solar cycle 24 // Solar Physics 213, № 1, pp. 03–212. 2003.
4. Sello S. Solar cycle activity: a preliminary prediction for cycle № 24 // Astronomy and astrophysics. V. 401. № 2. P. 681–693. 2003.

5. Bonev B. P., Penev K. M., Sello S. Long Term Solar Variability and the Solar Cycle in the 21st Century // *The Astrophysical J.* V. 605, Issue 1, Pt. 2, pp. L81–L84, 2004.
6. Деминов М. Г., Колесник А. Г., Лещенко Л. Н., Ситнов Ю. С., Цыбиков Б. Б. Климатические изменения критической частоты *E*-слоя ионосферы на средних широтах в полдень // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 43. № 3. С. 328–388. 2003.
7. Lorenz M. O. Methods of measuring concentration of wealth // *J. Am. Stat. Association*. V. 9, pp. 209–219, 1905.
8. Камаев В. Д. Экономическая теория. М.: Гуманит. Изд. центр. ВЛАДОС, 640 с. 1999.
9. Bogaert J., Zhou L., Tucker C.J., Myneni R. B., Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // *J. Geophys. Res. (Atmospheres)*, V. 107, Issue D11, pp. ACL 4\_1, CiteID 4119, DOI 10.1029/2001JD001075.
10. Распопов О. М., Дергачев В. А., Шумилов О. И., Крип К. М., Петрова Г. Н. Воздействие вариаций потока космических лучей, вызванных изменениями геомагнитного дипольного момента на изменчивость климата // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 40. № 1. С. 97–108. 2000.
11. Beig G. (Ed.). Long term changes and trends in the atmosphere // New Age Int. (P) Ltd. Publishers, 2001.
12. Lastovicka J. (Ed.). Long-term changes and trends in the atmosphere // *Phys. Chem. Earth*, V. 27, № 6–8, 2002.
13. Danilov A. D. Long-term trends of foF2 independent of geomagnetic activity // *Ann. Geophys.*, V. 21, pp. 1167–1176, 2003.
14. Нусинов А. А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 44. № 6. С. 1–8. 2004.

## **Изменчивость крайнего ультрафиолетового излучения Солнца как причина ограничения точности прогноза критических частот слоя F2**

А. А. Нусинов, Т. В. Казачевская.

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: nusinov@mail.ru*

Рассмотрены ограничения точности месячного прогноза критической частоты слоя F2 ионосферы, возникающие вследствие случайных вариаций крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) в течение месяца. Анализ  $SCO\%f$  - относительных значений месячных среднеквадратичных разбросов критических частот слоя F2 - и соответствующих им вариаций солнечного КУФ излучения -  $SCO\%u$  показал их зависимость от уровня солнечной активности. Делается вывод, что при использовании прогностических моделей месячных медиан для диагностики или прогноза  $foF2$  для конкретной даты ошибка вряд ли может быть менее  $\sim 7\%$  при низкой солнечной активности и  $\sim 15\%$  при высокой активности.

Ключевые слова: крайнее ультрафиолетовое излучение Солнца, прогноз критической частоты слоя F2 ионосферы

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Появление систематических ежесуточных, или более частых измерений ультрафиолетового излучения позволяет по-новому поставить вопрос о предельной точности моделей, используемых для диагностики и прогнозов состояния ионосферы. Известно, что ионизация на высотах слоя F2 ионосферы определяется крайним ультрафиолетовым излучением в области 16 - 74 нм (см., например, [1]). При формировании месячного прогноза ионосферы предполагается существование однозначной связи между состоянием ионосферы и уровнем солнечной активности. Обычно эта связь описывается с помощью "традиционных" индексов солнечной активности – числами пятен  $W$  или потоком радиоизлучения на волне 10.7,  $F_{10.7}$  (см, например, [2]).

В то же время ясно, что это предположение основано на статистических исследованиях и существование вариаций крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) ото дня ко дню нарушает однозначность этой связи, приводя к дополнительной погрешности прогнозируемой величины. Эта погрешность особенно существенна в связи с тем, что очень часто суточные прогнозы или диагностика состояния ионосферы выполняются на основе прогнозов среднемесячных или медианных значений параметров ионосферы.

Целью данной работы является исследование погрешностей, возникающих при прогнозе околосолнечных суточных значений критических частот слоя F2 вследствие существования вариаций крайнего ультрафиолетового излучения ото дня ко дню.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Оценим эти погрешности, сопоставив относительные величины среднеквадратичных отклонений (СКО%) потоков ультрафиолетового излучения: – СКО%<sub>u</sub> и СКО%<sub>f</sub> - критических частот слоя F2 от среднемесячных значений. Эти данные являются характеристикой разброса индивидуальных значений, вариаций излучения в течение месяца.

Для оценок вариаций СКО<sub>u</sub> – КУФ излучения использовались данные измерений на ИСЗ SOHO потоков излучения в области 26 - 34 нм и данные измерений излучения линии HLa ( $\lambda=121.6$  нм) со спутника SORCE (аппаратура SEM). Отметим, что в соответствии с различными модельными спектрами (например, [3-4]) поток квантов в области 26 - 34 нм составляет при среднем уровне солнечной активности примерно половину от потока в области 16-74 нм ответственной за ионизацию в области F ионосферы, причем только на долю яркой линии He II  $\lambda$  30.4 нм приходится около 20%.

Относительные месячные величины среднеквадратичного отклонения СКО% вычислялись как отношение СКО (среднее квадратичное отклонение) за данный месяц измерений к среднемесячному значению потока. Исключались дни с резко выделяющимися значениями наблюдаемых потоков, выходящими за интервал  $3\sigma \cdot \text{СКО}$  (как правило, эти значения соответствовали солнечным вспышкам).

Ионосферные данные критической частоты foF2 и соответствующие значения СКО%<sub>f</sub> были получены из Интернета для станций:

Чилтон (Слау) = (Chilton) за период 1996, 2001, 2003, 2005, 2007,

Рюген (Rugen)- за 2001, 2003 и 2005

Рим (Rome) - 2001, 2003, 2005

Выбранные данные охватывают как периоды вблизи максимума 23-го цикла солнечной активности - 2001,2003 гг, так и вблизи минимума – 1996, 2005, 2007 гг.

Исследовались только дневные значения критических частот (и СКО%<sub>f</sub>), средние за 11-12-13 часов местного времени.

Критические частоты подвержены сильным сезонным вариациям, маскирующим эффекты вариаций КУФ излучения. Для устранения эффектов сезонных вариаций годового хода использована аппроксимация значений критических частот полиномом 3 - 6 степени, затем для каждого дня формировалась разность наблюдаемых значений f<sub>o</sub>F2 и значений полинома, а затем для каждого месяца рассчитывалась относительная погрешность – СКО%<sub>f</sub> для этих разностей.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение КУФ излучения в 23-м цикле солнечной активности показано на рисунке 1: от минимума - начала 1996 г до 2007 г – вблизи конца. По оси абсцисс отложено время в Юлианских днях, по оси ординат поток в спектральном диапазоне 26 - 34 нм по измерениям на спутнике SOHO.

Видно, что поток КУФ в течение цикла солнечной активности изменяется почти в 4 раза от минимума до максимума, причем на более коротких отрезках времени вариации могут достигать десятков процентов.

На рисунке 2 демонстрируется зависимость от индекса F10.7 (ось абсцисс) среднемесячных вариаций - СКО%<sub>u</sub> излучения в спектральной полосе 26 - 34 нм по измерениям на спутнике SOHO в период 1996 - 2007 гг. (ось ординат).

Видно, что даже в минимуме активности (индекс F<sub>10.7</sub> ~ 70 с.е.п.) наблюдаются большие вариации потока излучения.

Аналогично тому, как анализировались данные СКО%<sub>u</sub> за месяц, можно рассмотреть разброс индивидуальных значений от среднего за год потока КУФ, назовём

их «среднегодовые величины  $СКО\%_{0uY}$ ». Эти величины характеризуют вариации излучения в течение года. Среднегодовые величины  $СКО\%_{0uY}$  для периода от максимума до минимума 23-го цикла солнечной активности приведено в таблице 1.

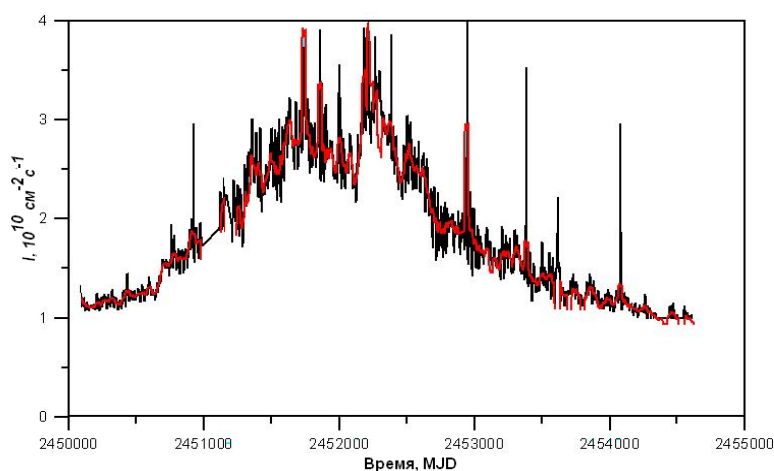


Рис. 1. Изменение КУФ излучения в цикле солнечной активности: от минимума-начала 1996 г. до 2007 г. – вблизи конца цикла. Время в Юлианских днях, по оси ординат поток в спектральном диапазоне 26 - 34 нм по измерения на спутнике SOHO.

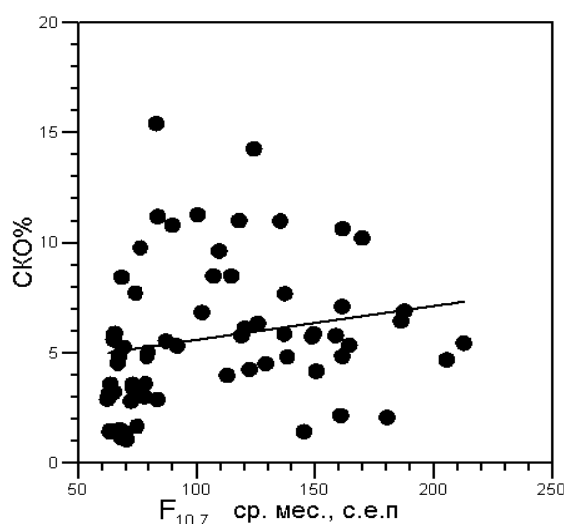


Рис. 2. Зависимость среднемесячных вариаций излучения в спектральной полос 26 - 34 нм -  $СКО\%$  от индекса радиоизлучения  $F_{10.7}$  в 23-м цикле солнечной активности в период 1996 - 2007 гг.  $F_{10.7}$  – в солнечных единицах потока, 1 с.е.п. =  $10^{-22}$  Вт·м<sup>-2</sup>Гц<sup>-1</sup>.

Таблица 1

«Среднегодовые величины  $СКО\%_{0uY}$ » - относительные среднеквадратичные отклонения индивидуальных значений от средней за год величины потока КУФ в диапазоне длин волн 26-34 нм по измерениям на спутнике SOHO

ГОДЫ	$СКО\%_{0uY}$
2002	9.44
2003	11.35
2004	7.64
2005	9.79
2006	6.70
2007	6.89
2008	5.30
2009	5.08

Из таблицы ясно, что и в глубоком минимуме 23 - 24 цикла активности 2006-2009 гг. разброс данных сравним с аналогичными месячными величинами не меньше, чем 5% измеряемой величины. Он увеличивается с ростом активности и достигает в максимуме активности значений 10 - 12%.

Результаты сопоставления относительного разброса  $f_oF2$  –  $СКО\%_f$  за период 1996-2007 гг. и относительного разброса потоков КУФ излучения в полосе 26 - 34 нм –  $СКО\%_u$  приведены на рисунке 3. для измерений на ионосферных станциях (Чилтон, Рюген, Рим).

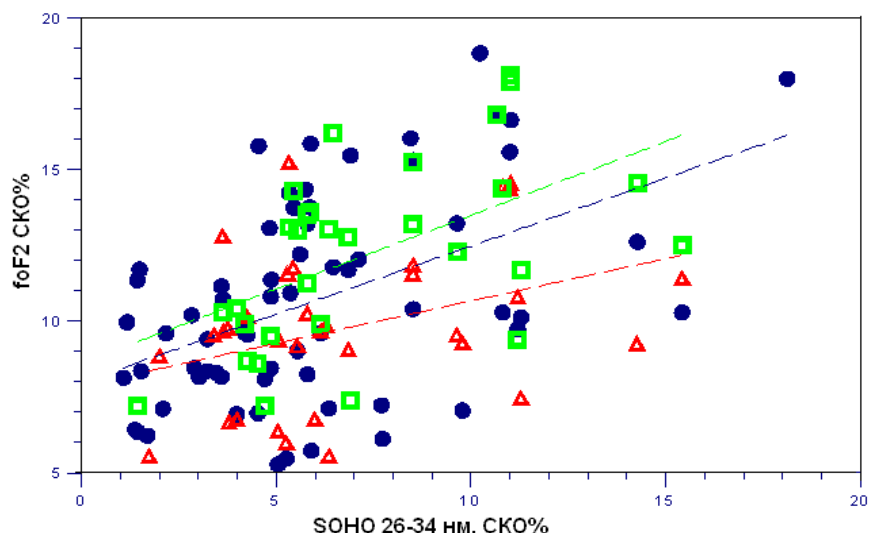


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности (среднемесячной)  $СКО\%_f$  критической частоты  $f_oF2$  области F2 - от относительных погрешностей измерений КУФ излучения в полосе 26-34 нм –  $СКО\%_u$  за период 1996 - 2007 гг. Измерения на ионосферные станции Чилтон - синие значки, Рюген - зеленые, Рим - красные.

Обсудим полученные результаты. Для всех станций наблюдается общая тенденция: увеличение  $СКО\%_f$  величин  $f_oF2$  с ростом  $СКО\%_u$  излучения КУФ области. Большой разброс данных измерений на разных ионосферных станциях в совокупности с влиянием солнечной активности затрудняют анализ.

Рассмотрим отдельно результаты измерений на ионосферной станции Чилтон за период 1996-2007 гг., т.е. почти за полный цикл солнечной активности. Эти данные показаны на рисунке 4, где по оси абсцисс отложены значения  $СКО\%_u$  излучения в полосе 26 - 34 нм КУФ области, а по оси ординат  $СКО\%_f$  значений  $f_oF2$ . Обозначения такие же, как и на рисунке 3. Штриховой прямой на рисунке представлен результат линейного регрессионного анализа. Экстраполяция этой прямой к нулевому аргументу (т.е. отсутствию флуктуаций излучения) дает ~ 8%, что, очевидно, соответствует вариациям ионосферы, не связанным с изменениями ионизирующего излучения ото дня ко дню.

На Рис. 5 демонстрируются те же данные, что и на рисунке 4: отдельно для периодов максимума (а) и минимума (б) 23-го цикла солнечной активности.

Из рисунка видно, что полученная выше оценка неопределенности  $f_oF2$ , связанной с несолнечными причинами (~ 8%), верна как для низкой, так и для высокой активности, а неопределенность, связанная с флуктуациями солнечного излучения, зависит от солнечной активности.

Этот вывод верен и для других изученных ионосферных станций и для отдельно взятых уровней солнечной активности – высокого, среднего и низкого. Наблюдения на ионосферных станциях Рюген и Рим (рисунки 6 и 7) демонстрируют, что сохраняется та же тенденция изменения  $СКО\%_f$  от  $СКО\%_u$ , как и для станции Чилтон. Из-за разброса данных и меньшего количества точек рисунок выглядит менее убедительно, но из них

также можно сделать вывод, что величина погрешности, не связанная с флуктуациями солнечной активности также близка к 7 - 8%, а рост солнечной активности может привести к неопределенности до 15 - 17%.

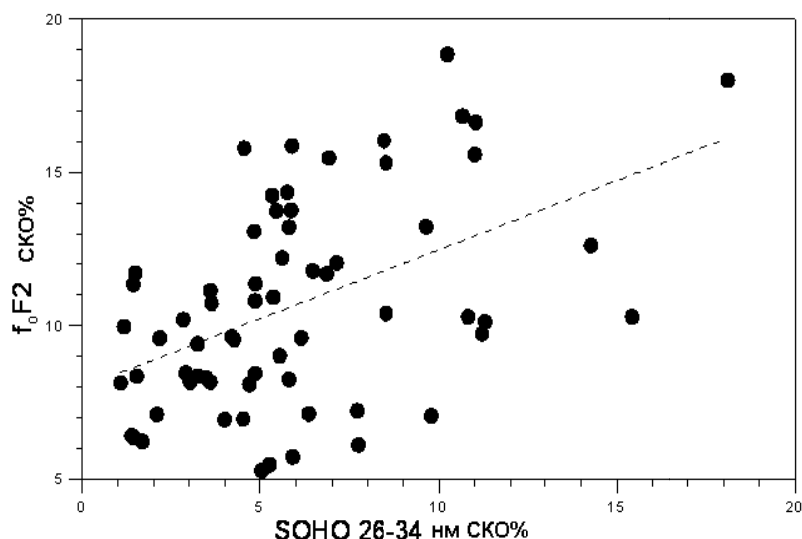


Рис. 4. Зависимость  $SCO\%_f$  среднемесячных значений  $f_oF2$  ионосферной станции Чилтон за период 1996 - 2007 гг. от  $SCO\%_u$  излучения в полосе 26 - 34 нм КУФ области по измерениям ИСЗ SOHO.

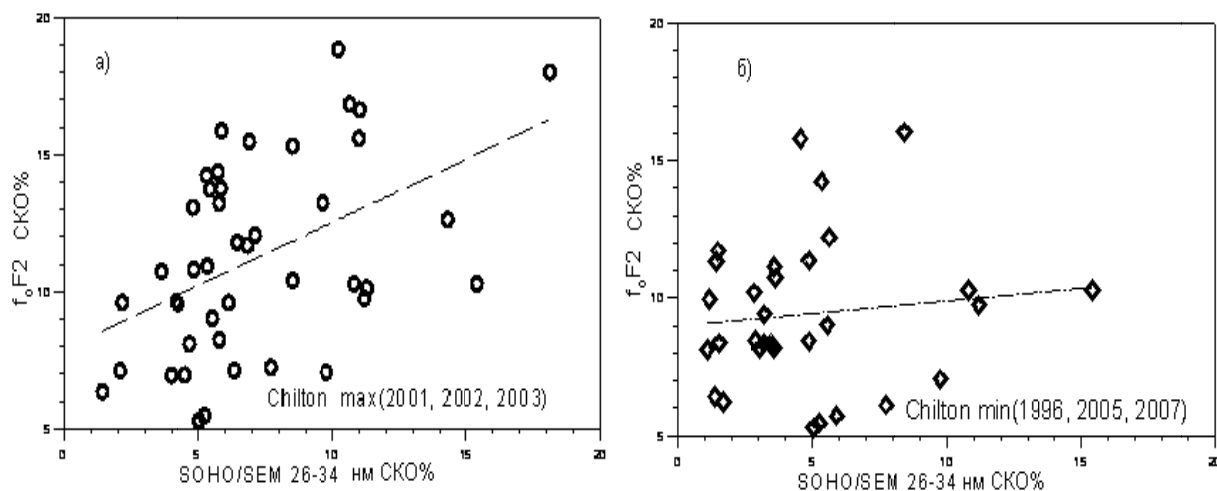


Рис. 5. Зависимость  $SCO\%_f$  среднемесячных значений  $f_oF2$  ионосферной станции Чилтон за период 1996 - 2007 гг. от  $SCO\%_u$  излучения в полосе 26 - 34 нм КУФ области по измерениям ИСЗ SOHO для максимума (а) и минимума (б) цикла солнечной активности.

Выше вариации ионосферы были рассмотрены в зависимости от потока в области 26 - 34 нм. Однако полученные результаты сохраняются и для других интервалов длин волн, например, для потока в линии 121.6 нм ( $L_a$ , линия Лайман-альфа), являющаяся индикатором вариаций всего потока ультрафиолетового излучения [5]. Были обработаны данные спутника SORCE, на котором производились измерения излучения Солнца в линии водорода  $H L_a$ . Были вычислены средние за месяц значения потока в линии и относительные средние отклонения  $SCO\%_u$ . Использованы данные за период 1996 - 2009 гг, т.е. за полный 23-й цикл солнечной активности. Результаты анализа, аналогичному проведенному выше, показывают, что вариации излучения в линии  $H L_a$

несколько меньше, чем в области 26 - 34 нм, однако, и для минимальных значений КУФ разброс данных СКО% не меньше 2 - 5% измеряемой величины, увеличиваясь до 10 - 11.5% в годы максимума активности.

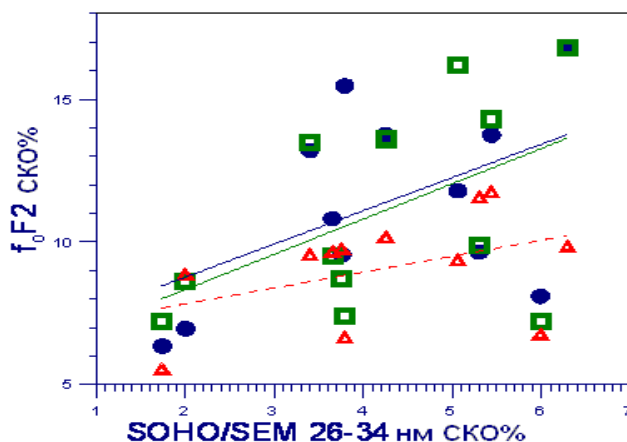


Рис. 6. Зависимость  $\text{СКО}\%_{\text{f}}$  среднемесячных значений  $f_0F2$  от  $\text{СКО}\%_{\text{u}}$  за 2001 год вблизи максимума цикла по измерениям ионосферных станций Чилтон, Рюген и Рим.

В среднем индекс  $F_{10.7} = 181$  с.е.п.

Ионосферные станции:

Чилтон – синие значки, Рюген - зеленые, Рим - красные.

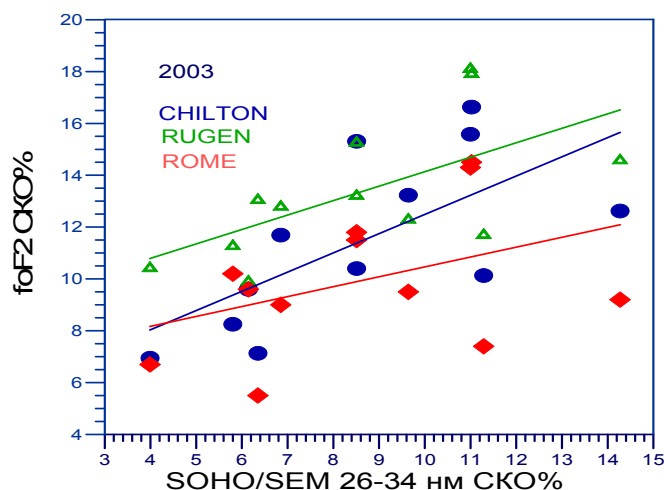


Рис. 7. Зависимость между  $\text{СКО}\%_{\text{f}}$  среднемесячных значений  $foF2$  от  $\text{СКО}\%_{\text{u}}$  по измерениям ионосферных станций Чилтон, Рюген и Рим за 2003 год – средний уровень активности

$F_{10.7} = 111$  с.е.п.

Ионосферные станции: Чилтон - синие значки, Рюген - зеленые, Рим - красные.

#### 4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы работы сводятся к следующему:

1. Относительный разброс ( $\text{СКО}\%$ ) ежесуточных значений  $foF2$  для времени вблизи полудня относительно среднемесячной величины зависит от уровня солнечной активности. При низком уровне он соответствует собственным шумам ионосферы и составляет  $\sim 7 - 8\%$  от среднемесячного значения.

2. С повышением уровня солнечной активности к этим шумам добавляется разброс, связанный с вариациями ультрафиолетового излучения в течение месяца (ещё до 8 - 10%).



3. В итоге при использовании прогностических моделей месячных медиан для диагностики или прогноза foF2 для конкретной даты ошибка вряд ли может быть менее ~ 7% при низкой солнечной активности и ~ 15% при высокой активности.

Указанные значения соответствуют принципиальным ограничениям на точность прогнозирования или оценок параметров ионосферы при использовании месячных моделей. Попытка увеличить точность прогнозирования привела к возникновению новых индексов активности, основанных на ионосферных измерениях (например, [6]).

Это направление может быть полезно, но более вероятно, что повышение точности моделей принципиально возможно только при использовании ежесуточных данных мониторинга крайнего ультрафиолетового излучения Солнца. Такое предложение высказывалось достаточно давно (например, в [7]) в связи с появлением регулярных длительных измерений крайнего ультрафиолетового излучения и до сих пор ожидает своей реализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lakshmi D. R., Reddy B. M. and Dabas R. S., On the possible use of recent EUV data for ionospheric predictions, // J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V 50. P. 207-213,.
2. Nusinov A. A., Katyushina V. V. Lyman alpha line intensity as a Solar activity index // Solar Physics. 1994. V. 152. N 1. P. 201-206.
3. Woods T. N., Tobiska W. K., Rottman G. J. and Worden J. R. Improved solar Lyman alpha irradiance modeling from 1947 to 1999 based on UARS observations. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 27195-27215.
4. Михайлов А. В., Терехин Ю. Л., Михайлов В. В. Региональный эффективный индекс солнечной активности для прогноза месячных медианных значений foF2. I. Построение и апробация // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 624-630.
5. Бруевич Е. А., Нусинов А. А. Спектр коротковолнового излучения для аэрономических расчетов при различных уровнях солнечной активности // Геомагнетизм и Аэрономия. 1984. Т. 24. N 4. С. 581- 585.
6. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце и ионосфера (коротковолновое излучение Солнца и его воздействие на ионосферу). – М.: Наука, 1969. – 480 с.
7. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. Ленинград. Гидрометеиздат. 1980. 190 с.

## **Прогнозирование геофизических возмущений по наблюдениям межпланетных мерцаний космических радиоисточников**

В. И. Власов<sup>1</sup>, И. В. Чашей<sup>1</sup>, П. М. Свидский<sup>2</sup>.

*1- Пуцунская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук*

*2- Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: svidsky@mail.ru*

Рассматриваются ключевые параметры радиоастрономических данных, пригодные для прогнозирования геофизических возмущений. Делается вывод о реальной возможности краткосрочного предсказания геомагнитных возмущений по радиоастрономическим данным. Обсуждаются основные вопросы практической реализации такого прогнозирования и, в частности, проблемы постановки радиоастрономического мониторинга межпланетной среды.

Ключевые слова: радиоастрономия, солнечный ветер, межпланетные мерцания, мониторинг, космическая погода, прогнозирование.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Существование разнообразных солнечно-земных связей, помимо прямого обеспечения жизни на Земле теплом и светом от Солнца, сейчас не вызывает сомнений. Их изучение все более приобретает также практическую направленность. Сейчас по аналогии с привычным понятием погоды на Земле в обиход внедряется понятие «космическая погода», справедливо отождествляемое в первую очередь с воздействием солнечной активности на Землю. Очевидно при этом, что любую погоду желательно знать заранее, уметь ее прогнозировать. Очевидно также, что для прогнозирования необходима информация, своевременно и непрерывно получаемая всеми возможными методами. Радиоастрономические методы и особенно метод картографирования межпланетной плазмы, в принципе, имеют уникальные возможности в этом отношении, поскольку позволяют вести наблюдения практически непрерывно, охватывая одновременно широкую область пространства. Важной задачей при этом является исследование распространяющихся от Солнца крупномасштабных межпланетных возмущений вспышечного происхождения, изучение их связи с активными процессами на Солнце, анализ их воздействия на Землю и, наконец, внедрение результатов в службу прогнозирования космической погоды. Принципиальная возможность краткосрочного (1 - 3 суток) прогнозирования геомагнитной активности по межпланетным мерцаниям радиоисточников была высказана нами ранее в [1-4] на основании прямой корреляционной зависимости между  $A_p$  – индексом и средним по небу индексом межпланетных мерцаний. Об этом же, как о новом методе прогнозирования геомагнитной активности, было заявлено также в работе [5].

## 2. КАК И ЧТО ВИДИТ РАДИОАСТРОНОМИЯ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

### ОСНОВЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

Для исследований межпланетного пространства мы используем методы просвечивания. Они основаны на изучении влияния среды между наблюдателем на Земле и далеким космическим радиоисточником на проходящее сквозь неё радиоизлучение. Как известно, околосолнечное и межпланетное пространство заполнено неоднородной межпланетной плазмой, непрерывно вытекающей с большими скоростями наружу от Солнца. Это так называемый солнечный ветер. Неоднородности электронной плотности солнечного ветра являются для радиоволны неоднородностями показателя преломления. В результате будут наблюдаться различные дифракционные эффекты. В основном это рассеяние (проявляется, как – увеличение видимых размеров источника) и интерференция радиоволн. В результате интерференции, в плоскости наблюдения (на поверхности Земли) возникает случайная дифракционная картина, которая движется относительно наблюдателя со скоростью, примерно равной скорости солнечного ветра. Это движение дифракционной картины вызывает быстрые (порядка 1 секунды) изменения интенсивности регистрируемого радиотелескопом радиоизлучения – межпланетные мерцания космических радиоисточников. Основной вклад в индекс мерцаний вносят неоднородности с масштабом, соответствующим масштабу первой зоны Френеля (порядка 100 км).

При определенных условиях в среде, может наблюдаться рефракция – смещение видимого положения радиоисточника, а также фокусировка радиоволн. Кроме того, в зависимости от вида радиоизлучения рассеяние может проявляться, как уширение короткого импульса излучения или как уширение узкой спектральной линии. При монохроматическом сигнале (например, от источника на космическом аппарате) могут непосредственно наблюдаться флуктуации фазы.

### МЕЖПЛАНЕТНЫЕ МЕРЦАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Здесь мы будем рассматривать только мерцания космических радиоисточников широкого спектра излучения, как наиболее эффективный инструмент для мониторинга солнечного ветра радиоастрономическими методами.

Наиболее широко используемыми величинами при наблюдениях межпланетных мерцаний являются индекс мерцаний  $m$ , характеризующий глубину модуляции регистрируемой интенсивности радиоисточника, и скорость  $V$  дифракционной картины, характеризующая скорость солнечного ветра. Индекс мерцаний (относительная дисперсия) определяется из наблюдений, как:

$$m^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2 \quad (1)$$

где  $I(t)$  – регистрируемая радиотелескопом интенсивность мерцающего радиоисточника,  $t$  - время,  $\langle I(t) \rangle = I_0$  – средняя интенсивность этого (не мерцающего) радиоисточника, а угловые скобки означают усреднение по времени.

Скорость  $V$  движения дифракционной картины измеряется по наблюдениям мерцаний на нескольких (желательно не менее трех) пространственно разнесенных радиотелескопах. Скорость определяется по пройденному дифракционной картиной расстоянию между радиотелескопами и соответствующему времени запаздывания мерцаний.

Заметим, что в отличие, например, от измерений на космических аппаратах, производимых в одной определенной точке пространства, радиоастрономический метод дает информацию в каждый момент времени обо всей толще межпланетной плазмы вдоль луча зрения. В принципе, вклад в формирование мерцаний дает вся межпланетная плазма, находящаяся на луче зрения от наблюдателя до внешней границы гелиосферы. Однако максимальный вклад в мерцания дает слой неоднородностей конечной толщины, локализованный в определенном месте на луче зрения. Этот слой мы называем эффективным слоем. В связи с тем, что флуктуации электронной концентрации  $\Delta N_e$  сильно зависят от их гелиоцентрического расстояния  $\langle \Delta N_e^2 \rangle \propto r^{-4}$ , наибольший вклад в мерцания радиоисточника дает область наибольшего сближения луча зрения с Солнцем, на прицельном расстоянии  $r_{\min} = r_o \sin \varepsilon$  (Рис. 1). Расстояние от наблюдателя на Земле до такого эффективного слоя неоднородностей равно  $z_o = r_o \cos \varepsilon$ . Здесь  $\varepsilon$  – элонгация (угловое расстояние между источником и Солнцем),  $r_o = 1$  а.е.

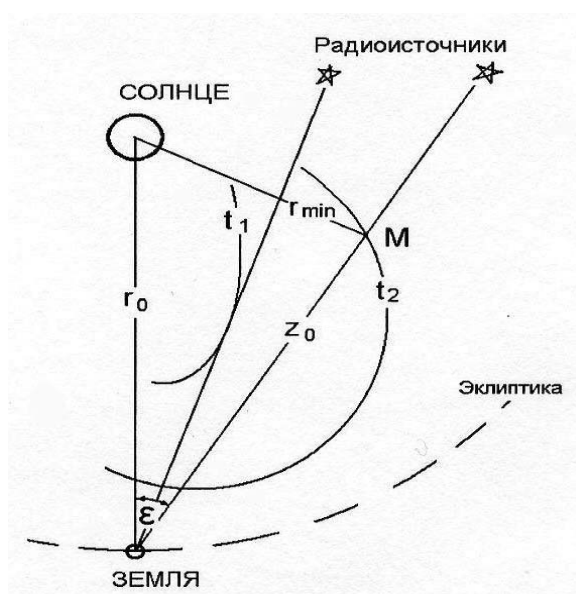


Рис. 1. Схема наблюдений мерцающих радиоисточников.

На рисунке 1 дугообразными кривыми показаны условные положения фронта распространяющегося от Солнца возмущения межпланетной среды в моменты  $t_1$  и  $t_2$ . Момент  $t_2$  соответствует пересечению луча в области эффективного слоя, поэтому изменение индекса мерцаний  $m$  на данной элонгации  $\varepsilon$  будет максимальным. Иное дело в момент  $t_1$  на меньшей элонгации. Здесь контрастность будет меньше. Однако, если изменение индекса мерцаний  $\Delta m$  до и после момента  $t_1$  окажется значимым, станет возможным определить максимальную элонгацию границы возмущенной области в данный момент, причем с тем большей точностью, чем меньше угловое расстояние между соседними доступными для наблюдения радиоисточниками. Это легло в основу рассмотренного ниже метода использования  $\Delta m$ -карт для мониторинга распространяющихся возмущений.

Следует отметить, что методом мерцаний просматривается не вся внутренняя гелиосфера. Вдали от Солнца, где электронная плотность в солнечном ветре мала, мерцания слабые. С приближением к Солнцу (с ростом электронной концентрации) мерцания возрастают, но на определенном расстоянии от Солнца начинает преобладать рассеяние радиоволн, видимые угловые размеры наблюдаемых источников растут, и мерцания быстро затухают.

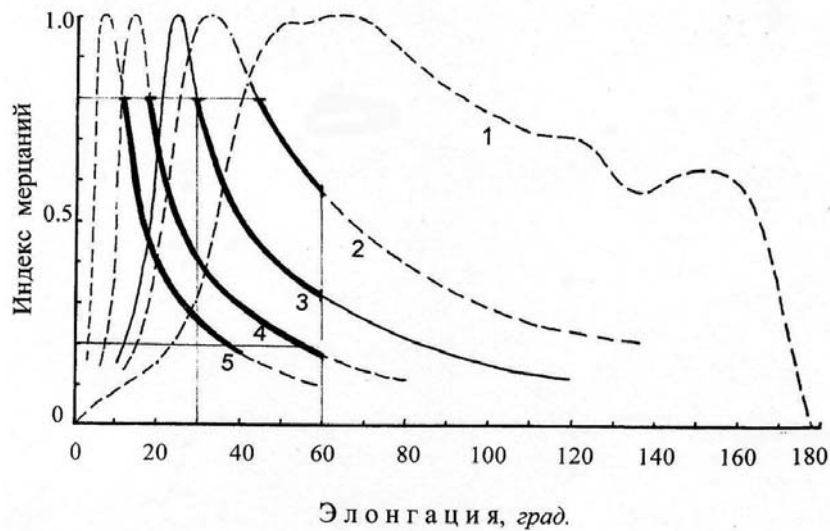


Рис. 2. Зависимость среднего индекса мерцаний на разных частотах от элонгации: кривые 1 – 34 МГц, 2 – 74 МГц, 3 – 102,5 МГц, 4 – 195 МГц, 5 – 430 МГц.

Пространственное положение этих областей, где преобладают эффекты мерцаний или рассеяния, зависят от радиочастоты наблюдений. На рис.2 показаны зависимости индекса мерцаний от элонгации, полученные из наблюдений межпланетных мерцаний разными авторами, на разных частотах [7-9]. Кривые 1 – 5 соответствуют частотам от 34 МГц (кривая 1) до 430 МГц (кривая 5). Данные этого рисунка могут быть полезны для принятия практических решений при организации наблюдений в целях прогнозирования. Выделенные фрагменты на кривых приблизительно показывают пределы расстояний (элонгаций) от Солнца, где мерцания информативны для прогнозирования, т. е. где вариации индекса мерцаний адекватно отражают состояние межпланетной плазмы. Эти фрагменты мы условно ограничили по индексу мерцаний (сверху) величиной  $m = 0.8$ , чтобы обеспечить «свободу» для положительных вариаций. Нижняя граница  $m = 0.2$  выбрана из соображений реальных характеристик радиотелескопа и наличия достаточного числа мерцающих радиоисточников. На рисунке четко видна зависимость зондируемых областей от частоты наблюдений. Видно, например, что, наблюдения мерцаний на низких частотах (кривая 1) не пригодны для прогнозирования, т.к. источники мерцают уже запоздало, далеко за пределами орбиты Земли. Наши наблюдения на частоте 102.5 МГц (кривая 3) позволяют контролировать состояние межпланетной плазмы начиная с гелиоцентрических расстояний 0.4-0.5 а.е.

#### МЕТОД КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ИНДЕКСОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

Наиболее информативным для исследований крупномасштабных возмущений солнечного ветра показал себя метод картографирования межпланетной плазмы, впервые реализованный нами в 1975 году [1,10]. Он основан на получении двумерного пространственного распределения индексов мерцаний для большого числа равномерно рассеянных по небу космических радиоисточников. Но индекс мерцаний непосредственно зависит от состояния межпланетной среды. Между ним и характеристиками электронной плотности межпланетной плазмы имеется прямая зависимость [13]:

$$m^2 \propto \langle \Delta n^2 \rangle \propto \langle \Delta N_e^2 \rangle \propto \langle N_e^2 \rangle \quad (2)$$

(здесь  $m$  – индекс мерцаний,  $\Delta n$  – флуктуации показателя преломления межпланетной плазмы,  $\Delta N_e$  – флуктуации электронной плотности,  $N_e$  – электронная плотность). Поэтому карты индексов мерцаний фактически являются картами межпланетной турбулентной плазмы, т.е. представляют собой ее двумерное изображение в картинной плоскости неба. Получается изображение межпланетной плазмы, подобное фотографиям солнечной короны. Этот метод дает уникальную возможность (другие развивающиеся способы, например, использующие эффект рассеяния ГКЛ на крупномасштабных неоднородностях ММП [21], не являются альтернативными данному методу, а дополняют его) видеть состояние межпланетной плазмы и происходящие в ней процессы в целом, в масштабах внутренней гелиосферы. Пример таких пространственных карт показан на рис.3. Каждая карта получена [11] нанесением ежедневных значений индексов мерцаний на экваториальную сетку координат согласно пространственному расположению соответствующих мерцающих радиоисточников. В течение дня наблюдалось порядка 150 мерцающих источников. Измеренные индексы мерцаний нормировались к индексу мерцаний точечного источника, чтобы исключить влияние размеров и структуры наблюдаемых радиоисточников. Значения индексов мерцаний разделены по величине на четыре интервала:  $0.2 \geq m > 0$ ,  $0.4 \geq m > 0.2$ ,  $0.6 \geq m > 0.4$ ,  $m > 0.6$ . На картах эти интервалы обозначены соответственно индексами от 1 до 4 и отделены друг от друга сплошными линиями. Пунктир обозначает границу наличия и отсутствия данных. Положению Солнца соответствует пересечение двух прямых, обозначающих полярное направление и линию пересечения плоскости солнечного экватора с картинной плоскостью.

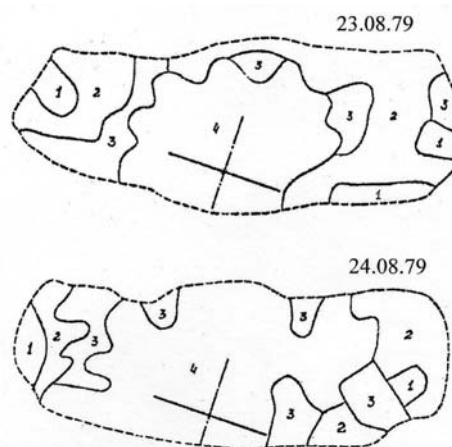


Рис. 3. Карты пространственного распределения индексов межпланетных мерцаний:  
1 – интервалы индексов  $0.2 \geq m > 0$ ; 2 -  $0.4 \geq m > 0.2$ ; 3 -  $0.6 \geq m > 0.4$ ; 4 –  $m > 0.6$ .

С 1975 по 1985 годы нами было получено несколько серий таких карт, регулярных, ежедневных, протяженностью в среднем по 50 - 60 дней каждая. На регулярных рядах таких карт наблюдается непрерывно меняющаяся день ото дня картина крупномасштабных неоднородностей в виде отдельных «облаков» и сравнительно долгоживущих (в течение нескольких суток и более) неоднородностей в виде «языков», вытянутых более плотных областей межпланетной плазмы. Из сравнения карт разных периодов видно, что характерная структура крупномасштабных неоднородностей в среднем не меняется. Всегда выделяется эти два типа крупномасштабных неоднородностей: неоднородности, время изменения которых составляет порядка суток, и неоднородности, живущие несколько суток и даже месяцев.

Из наблюдений разнообразных геофизических явлений и из сопоставления их с солнечными и межпланетными явлениями ясно, что геоэффективными, вызывающими заметные возмущения на Земле, являются крупномасштабные возмущения в солнечном ветре. Радиоастрономические наблюдения межпланетных мерцаний, прямые измерения характеристик межпланетной плазмы на космических аппаратах, исследования солнечно-земных связей показывают, что в межпланетном пространстве преобладают два типа крупномасштабных возмущений:

1. Долгоживущие, вращающиеся с Солнцем (коротирующие) высокоскоростные ( $> 500$  км/с) потоки солнечного ветра. Источниками таких потоков являются корональные дыры на Солнце. Истечение высоко - скоростного солнечного ветра из корональных дыр имеет радиальную направленность и происходит непрерывно на протяжении времени их жизни, иногда в течение нескольких оборотов Солнца. В результате, в межпланетном пространстве образуется крупномасштабная спиральная структура солнечного ветра. В области взаимодействия этого быстрого и окружающего медленного солнечного ветра формируется межпланетная ударная волна с резким сжатием и усилением плотности межпланетной плазмы и магнитного поля на переднем фронте волны.

2. Распространяющиеся от Солнца возмущения типа взрывных ударных волн. Они связаны с кратковременными проявлениями солнечной активности типа вспышек, возбуждаются вблизи от Солнца и расширяются радиально от места возникновения. Межпланетные ударные волны формируются в основном на передних фронтах выбросов корональной массы (CME – Coronal Mass Ejection) из Солнца. Для таких выбросов характерно резкое сжатие и усиление флуктуаций плотности межпланетной плазмы и магнитного поля на фронте волны. Их иногда называют также магнитными облаками, поскольку внутри они заполнены вращающимся магнитным полем.

В наблюдениях межпланетных мерцаний крупномасштабные возмущения проявляются:

- как вариации индекса мерцаний на кривых  $m(t)$ , (пример на рис. 4),
- как максимумы пространственно-временных функций корреляции,
- как неоднородности, наблюдаемые непосредственно на картах индексов мерцаний.

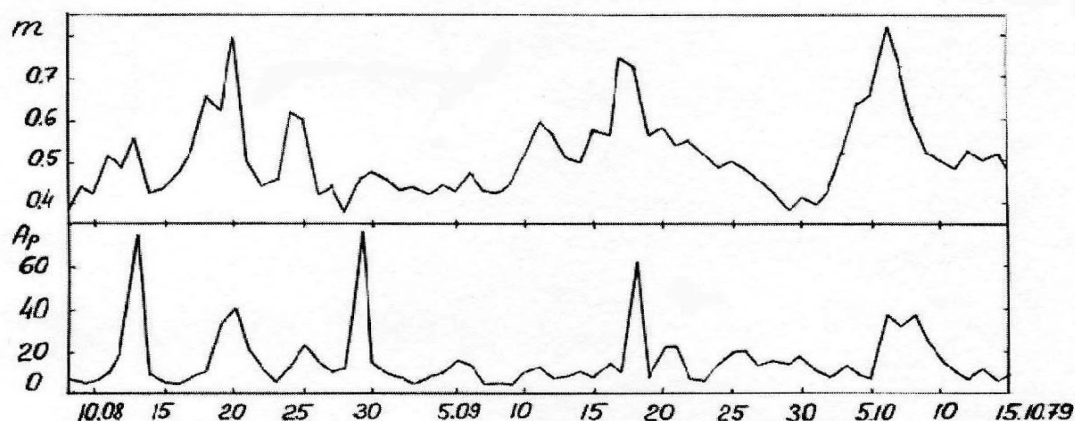


Рис. 4. Сопоставление суточных индексов: мерцаний  $\langle m \rangle$  и магнитной активности  $A_p$ .

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ТИПА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН, НАБЛЮДАЕМЫХ ПО РАДИОМЕРЦАНИЯМ

#### КЛЮЧЕВЫЕ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Первым, главным условием применимости радиоастрономических данных для такого прогнозирования, очевидно, является своевременное обнаружение крупномасштабных геоэффективных межпланетных возмущений и последующая оперативная оценка их основных (ключевых) параметров, пригодных для прогнозирования. Такими ключевыми параметрами являются: направление распространения, угловые размеры, скорость фронта и транспортное время прихода межпланетных возмущений к Земле.

В принципе, на ежедневных картах индексов мерцаний, т.е. на  $m$ -картах межпланетной плазмы содержится вся пространственно-временная информация, необходимая для оценки ключевых параметров межпланетных возмущений. Однако, непосредственно на таких картах прочесть характеристики конкретных возмущений оказалось довольно сложно, а часто вообще невозможно. Это связано с одновременным присутствием разных пространственно-временных типов крупномасштабных межпланетных неоднородностей с большим разнообразием их видимых размеров, форм, скоростей и направлений движения. Здесь нас в первую очередь интересуют характеристики межпланетных возмущений вспышечного происхождения типа распространяющихся от Солнца межпланетных ударных волн. Нужен способ надежного выделения таких возмущений на фоне крупномасштабных неоднородностей других типов для оперативной оценки их основных ключевых параметров.

#### ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН, $\Delta m$ - КАРТЫ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

При радиоастрономических наблюдениях мерцаний космических радиоисточников в условиях спокойного солнечного ветра индекс мерцаний каждого из наблюдаемых источников остается практически неизменным день ото дня. Имеет место лишь медленное изменение уровня мерцаний, связанное с годичным изменением элонгации - видимого углового расстояния источника от Солнца. При наблюдениях мерцаний радиоисточников в условиях возмущенного солнечного ветра во время пересечения луча зрения ударной волной регистрируется усиление мерцаний, вызванное увеличением плотности неоднородной плазмы на фронте волны (см. также рисунок 1 и пояснения к нему). Для выявления таких межпланетных возмущений типа ударных волн нами строились [12] двумерные пространственные распределения величины

$$\Delta m_i = 2(m_{i,j} - m_{i,j-1}) / (m_{i,j} + m_{i,j-1}) \quad (3)$$

Здесь  $i$  – номер источника,  $j$  - дата наблюдений.

Здесь применена нормировка на сумму индексов мерцаний этих двух соседних дней наблюдений, чтобы исключить влияние расстояния от Солнца. Коэффициент 2 взят только для того, чтобы сохранить в среднем масштабы  $\Delta m$  и  $m$ , но он может быть и совершенно произвольным.

Ясно, что величина  $\Delta m$  при этом будет реагировать на изменения межпланетной плазмы, зондируемой данным источником. В этом смысле все значения  $\Delta m$  можно разделить на три части:

-  $\Delta m_i = 0$  - это означает, что состояние межпланетной плазмы не изменилось по сравнению с предыдущим днем наблюдений;



-  $\Delta m_i > 0$  - мерцания усилились по сравнению с предыдущим днем. Это значит, что фронт возмущения пересекает зондируемую область межпланетной плазмы;

-  $\Delta m_i < 0$  - фронт возмущения вышел из зондируемых областей межпланетной плазмы.

На карты наносились положения только тех радиисточников, которые показали увеличение индекса мерцаний в данный день по сравнению с предыдущим днем. При этом положение фронта возмущения определялось по гладкой кривой, которая отделяет возмущенную и невозмущенную области. Ясно, что карты пространственного распределения этих значений  $\Delta m_i > 0$  выявляют распространяющиеся межпланетные возмущения, а непрерывная последовательность таких карт позволяет видеть пространственно-временную эволюцию этих возмущений. Примеры  $\Delta m$ -карт таких межпланетных ударных волн приведены на рис. 5. Очевидным преимуществом таких  $\Delta m$ -карт является «самокалибровка», настройка на распространяющиеся от Солнца возмущения типа межпланетных ударных волн вспышечного происхождения. Это как бы метод фильтрации межпланетных возмущений разного типа. Еще более наглядно и эффективно этот метод работал бы, если бы можно было получать такие карты чаще, скажем каждый час (получать фильм с частотой, например, 12 или 24 кадров в единицу времени), а не один раз в сутки. В принципе, это вполне возможно. А пока заметим, что таким методом можно также выявлять неоднородности солнечного ветра и других типов [19], подобрав удобный для анализа временной масштаб. Заметим также, что рассмотренные здесь карты дают первое качественное, но существенное для целей прогнозирования, представление о наличии и характере возмущения, о его ориентации и скорости распространения от Солнца, о геометрических характеристиках фронта возмущения.

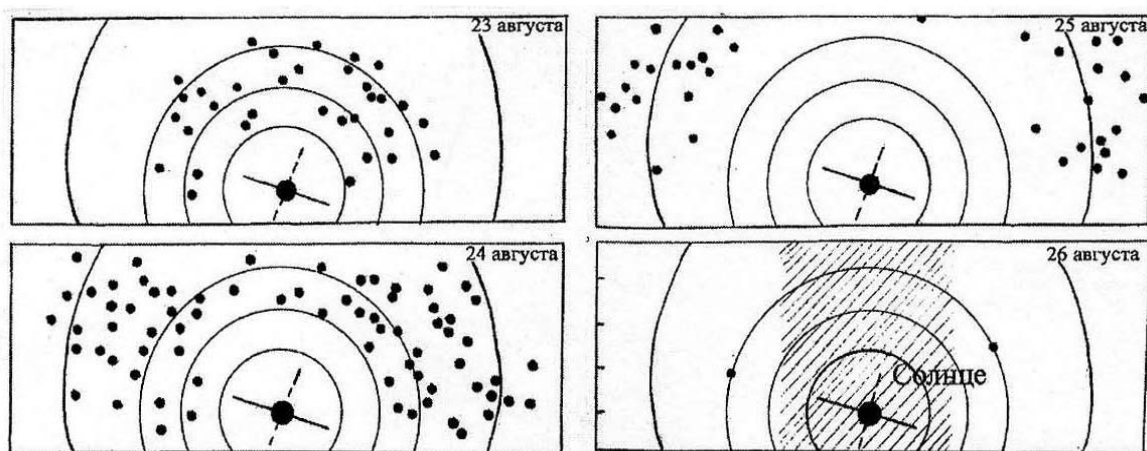


Рис. 5. Пример  $\Delta m$  – карт распространяющегося от Солнца межпланетного возмущения, (23 – 26 августа 1979 года)

#### СКОРОСТЬ ФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН НА РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СОЛНЦА

На рис. 6 показаны карты межпланетной ударной волны в гелиоцентрических координатах:  $r$  - расстояние от Солнца,  $\varphi$  - гелиоширота. Скорость ударного фронта может быть оценена по пройденному пути и соответствующему интервалу времени:

$$V = \Delta r / \Delta t = (r_{j+1} - r_j) / (t_{j+1} - t_j) \quad (4)$$

Здесь  $r_j$  - радиус-вектор фронта волны в направлении ее распространения, т.е. радиальное расстояние от Солнца до положения фронта в день наблюдений,  $t_j$  - время регистрации фронта волны,  $j$  - дата наблюдений (см. также Рис. 1). Если ударная волна отождествлена с определенной вспышкой на Солнце, то можно также оценить среднюю на соответствующем отрезке пути от Солнца скорость фронта ударной волны. В работе [12] показано, что:

- скорость фронта ударной волны уменьшается с увеличением расстояния от Солнца при  $r > 0.1$  а.е.
- темп замедления зависит от начальной величины скорости  $V_0$  ударной волны.
- наблюдательные данные соответствуют соотношению  $dV / dr \propto V_0^2$ .

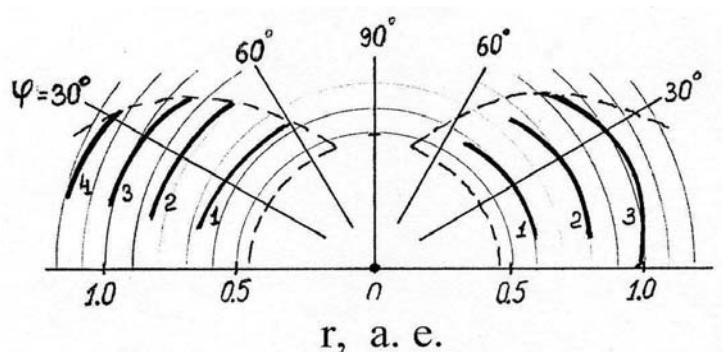


Рис. 6. Пример  $\delta m$  – карт межпланетной ударной волны,  $r$  - расстояние от солнца (в астрономических единицах),  $\varphi$  – гелиоширота.

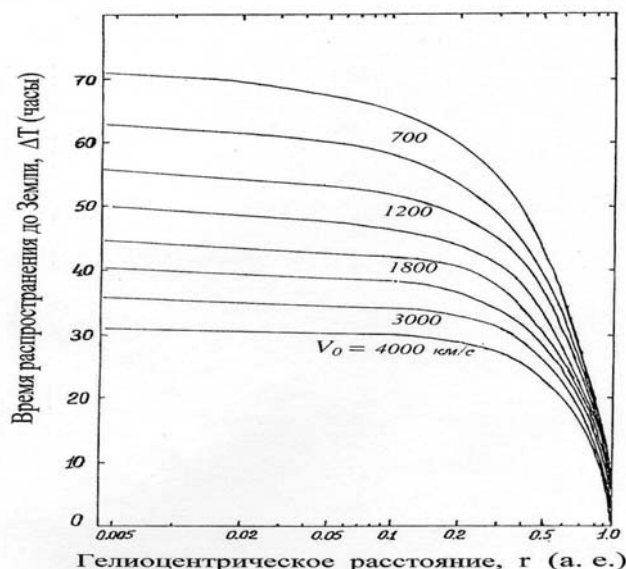


Рис. 7. Зависимость времени распространения ударной волны (с начальной скоростью  $V_0$ ) от гелиоцентрического расстояния  $r$  до Земли, т.е. заблаговременности прогноза  $T$ .

Учет характера изменения скорости ударной волны при её распространении от Солнца важен при практическом прогнозировании, поскольку это позволяет уточнить оценку времени предсказания земных событий. На основе полученных зависимостей  $V(r)$  была построена модельная зависимость  $T(r)$  времени распространения ударной волны от места ее обнаружения до Земли (Рис. 7). Здесь  $r$  – наблюдаемое гелиоцентрическое расстояние фронта ударной волны.

Из этого рисунка видно, что время распространения межпланетных ударных волн от Солнца на расстояние 1 а.е. находится в пределах 1,5 – 3 суток. Обсуждаемые наблюдения проводились на частоте 102,5 МГц. На данной частоте, как указывалось выше (см. Рис. 2 и комментарий к нему), индекс мерцаний «чувствует» изменения состояния межпланетной плазмы, начиная с гелиоцентрических расстояний 0,4 - 0,5 а.е. Поэтому, как это видно из рис. 7, возможная заблаговременность предсказания событий на Земле, связанных с приходом ударной волны, по этим наблюдениям находится в пределах 20 – 50 час.

#### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Прежде, чем по наблюдениям оценивать время возникновения возмущения на Земле, необходимо оценить произойдет или не произойдет это событие. Иначе говоря, заденет или не заденет межпланетное возмущение Землю? Очевидно, что для этого нужно знать не только скорость распространения, но и геометрию фронта ударной волны, по крайней мере, направление ее расширения и поперечные размеры. Размеры и направление движения фронта ударной волны выявляются непосредственно по радиоизображениям (по картам  $\Delta m$ ) межпланетных возмущений. Оцененные по нашим измерениям угловые размеры (диаметр) межпланетных ударных волн в среднем составляют [19,20]:

- в гелиоширотном сечении –  $90^\circ$
- в гелиодолготном сечении –  $115^\circ$

Это средние размеры. Однако иногда наблюдаются межпланетные возмущения как очень больших угловых размеров, так и весьма узконаправленные возмущения. Например, ударная волна от вспышки 18 Августа 1979 года имела исключительно большие угловые размеры. Она вызвала сильное геомагнитное возмущение, несмотря на то, что генерировавшая её вспышка находилась на краю за лимбом Солнца.

Пример необычного узконаправленного события, наблюдавшегося единственный раз за весь период двухмесячных серий наших наблюдений с 1975 по 1985 годы, показан на рис. 8. Приведен небольшой фрагмент данных из наблюдений, проводившихся в течение августа – сентября 1979 года. Здесь представлены в зависимости от даты наблюдений значения  $\langle m_1 \rangle$  и  $\langle m_2 \rangle$  - индексы мерцаний, усредненные по всем наблюдаемым источникам, просвечивающим соответственно ближние (0.5 - 0.8 а. е.) и дальние (0.8 – 1.1 а. е.) от Солнца области межпланетной среды;  $A_p$  - индекс геомагнитной активности.

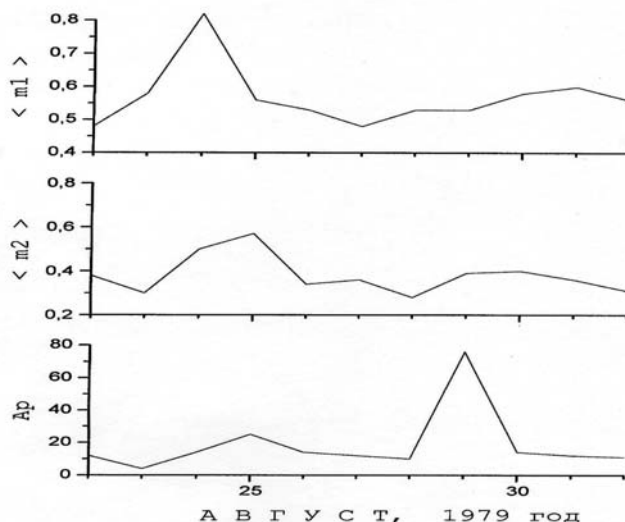


Рис. 8. Изменение среднесуточных индексов мерцаний  $\langle m_1 \rangle$ ,  $\langle m_2 \rangle$  и геомагнитной активности  $A_p$  (пояснения – в тексте).

Видно, что в рассматриваемые дни имели место два случая усиления геомагнитной активности. В первом случае, достаточно скромному усилению геомагнитного  $Ap$  – индекса, наблюдавшемуся 24 - 25 Августа, предшествовало заметное усиление в индексе межпланетных мерцаний. Можно предположить, что в это время через межпланетную среду от Солнца в направлении Земли прошло достаточно мощное крупномасштабное возмущение. Действительно, на картах пространственного распределения значений  $\Delta m_i > 0$  в эти дни выявляется межпланетная ударная волна в западном направлении от Солнца. В работе [12] она отождествляется со вспышкой балла 3В, наблюдавшейся 21 Августа 1979 года, в  $6^h 15^m UT$ , в северо-западном секторе диска Солнца с координатами  $17^0N\ 40^0W$ . Оцененная при этом скорость фронта ударной волны на гелиоцентрическом расстоянии 0.87 а.е. и 0.49 а.е. составила соответственно 500 и 570 км/с. Нецентральное направление волны, невысокая скорость распространения и умеренные значения  $Ap$ -индекса говорят о том, что в данном случае ударная волна «задела» Землю лишь своей внешней областью. Это довольно типичный, часто встречающийся случай.

Совсем по иному выглядят события последующих дней. Каких либо заметных вариаций величины индекса мерцаний  $\langle m1 \rangle$  и  $\langle m2 \rangle$  в этот период не наблюдается. Очевидно, что прогнозирование на основании только этих данных однозначно предсказало бы спокойную геомагнитную обстановку. Однако мы видим 29 Августа неожиданно резкое усиление  $Ap$  – индекса. Факт на первый взгляд необъяснимый. Вопрос, однако, несколько проясняется при рассмотрении карт пространственного распределения значений  $\Delta m_i > 0$ , т.е. карт крупномасштабных межпланетных возмущений. Действительно, на картах в эти дни выявляется межпланетная ударная волна достаточно ограниченного углового размера  $\leq 50^0$  и направленная строго от Солнца к Земле. В работе [12] она справедливо отождествляется с яркой вспышкой балла 3В, наблюдавшейся 26 Августа 1979 года, в  $16^h 15^m UT$ , практически в центре диска Солнца с координатами  $5^0N\ 9^0W$ . Заметим, что межпланетные мерцания на рабочих частотах 100 – 150 МГц наших радиотелескопов, на малых элонгациях ближе  $25^0$  от Солнца не наблюдаются из-за преобладания так называемого эффекта рассеяния, о чем кратко уже упоминалось выше. По этой причине основная, центральная часть фронта такой узконаправленной от Солнца к Земле ударной волны не проявляется в индексах мерцаний наблюдаемых радиоисточников. На картах значений  $\Delta m_i > 0$  этих дней проявляется лишь слабая периферийная область межпланетной ударной волны, не вызывающая сильных изменений в величине индекса мерцаний. Однако на геомагнитную обстановку такая ударная волна естественно оказывает максимальное воздействие. Этот случай подтверждает, в частности, что наиболее информативными для прогнозирования по радиоастрономическим данным являются не сами по себе вариации среднего по небу индекса мерцаний, а полноценные  $\Delta m$  - карты крупномасштабных межпланетных возмущений.

Заметим, что подобная «центральная» и узконаправленная ударная волна еще меньших угловых размеров нами вообще бы осталась незамеченной. Чтобы ее обнаружить потребовалось бы зондировать близкие к Солнцу области межпланетной плазмы и, следовательно, привлекать для наблюдений радиотелескопы более высокочастотных диапазонов, возможно вплоть до миллиметровых волн. Но это стало бы почти неразрешимой проблемой, поскольку для прогнозирования требуется непрерывное наблюдение узкой области около Солнца, а такие радиотелескопы ориентированы в основном на широкий круг научных задач. Поэтому в подобных ситуациях для прогнозирования следует привлекать другие средства и методы. А практика показывает, что оптимальным для мониторинга методом измерения характеристик межпланетных мерцаний является использование радиотелескопа диапазона метровых волн (100 - 300 МГц).

#### 4. ВОЗМОЖНОСТИ, ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Что же препятствует реализации прогнозирования? Казалось бы, принципиальная возможность такого прогнозирования не вызывает сомнений. Напомним, что первые выводы о принципиальной возможности прогнозирования геомагнитной активности были получены в работе [1] по результатам наблюдений межпланетных мерцаний в течение 24 дней в октябре-ноябре 1975 года. Сопоставление индексов мерцаний с индексами геомагнитной активности указывало на наличие прямой зависимости между ними. Было предположено, что это может служить основой для выяснения возможности прогнозирования с помощью радиоастрономических данных влияния солнечных явлений на Землю. В дальнейшем более продолжительные серии наблюдений большого числа мерцающих источников в августе-октябре 1976 года (63 дня) и в сентябре-октябре 1977 года (51 день наблюдений) подтвердили эти первые выводы. Анализ семейства кривых изменения индексов мерцаний  $m_i(t)$  для всех наблюдавшихся источников выявил резкое возрастание в отдельные дни индексов мерцаний многих радиоисточников. Сопоставление кривых  $m_i(t)$  с кривой изменения планетарного геомагнитного индекса  $A_p(t)$  показало, что некоторые случаи усиления мерцаний сопровождаются возрастанием  $A_p$ -индекса. Был также проведен корреляционный анализ связи между средним по всем наблюдаемым источникам индексом мерцаний и  $A_p$ -индексом. Было показано наличие значимых корреляции и запаздывания  $A_p$ -индексов по отношению к индексам межпланетных мерцаний [2-4]:

- коэффициент взаимной корреляции между вариациями индекса мерцаний  $m$  и геомагнитного индекса  $A_p$  в различные годы достигает величины 0,5 – 0,85

- время запаздывания  $A_p$  относительно  $m$  составляет 1 – 3 суток для вариаций, связанных с распространяющимися возмущениями, и 6 – 8 суток для вариаций, вызванных долгоживущими, коротирующими с Солнцем, высокоскоростными потоками.

Таким образом, подтверждалась возможность использования индексов межпланетных мерцаний для прогнозирования геофизических эффектов. Однако, применение соотношений, полученных из корреляционного анализа кривых  $\langle m_i(t) \rangle$  и  $A_p(t)$ , оказалось неэффективным для прогнозирования. Средняя по небу величина  $\langle m_i(t) \rangle$  не несет достаточной, прежде всего пространственной, информации о ключевых параметрах геоэффективности межпланетных возмущений. Поэтому окончательное подтверждение практической полезности применения радиоастрономических данных по наблюдениям межпланетных мерцаний при прогнозировании геофизических возмущений было получено лишь после перехода к построению  $m$ -карт индексов межпланетных мерцаний. А точнее -  $\Delta m$ -карт межпланетных возмущений («метод картографирования», см. выше в разделе 2), по которым более чётко выявляются динамические процессы в межпланетной среде, перемещение неоднородностей, прохождение ударных волн.

В процессе получения и использования радиоастрономических данных, естественно, возникают разнообразные вопросы, требующие соответствующего решения. Есть вопросы технические, связанные с конкретными, доступными для получения наблюдений радиотелескопами. Есть вопросы методики наблюдений, регистрации и обработки наблюдательных данных. Наконец, есть вопросы использования, практического применения полученных экспериментальных данных. Многие из таких вопросов встречались и решены в прежних наших сериях наблюдений. Опыт показывает, что все эти частные вопросы разрешимы. Разрешимы даже вопросы, связанные с внешними, объективными причинами, например, вызванные редкими нетипичными событиями в солнечном ветре. Возникнут, очевидно, новые вопросы непосредственно при реальной

постановке наблюдений в целях прогнозирования «космической погоды». Их также желательно выявить путем предварительных макетных испытаний.

Есть, однако, один общий вопрос, единственная проблема обсуждаемого прогнозирования - это проблема получения необходимых наблюдательных данных. Короче говоря, проблема - в радиотелескопе, точнее в отсутствии радиотелескопа для таких наблюдений.

## 5. РАДИОТЕЛЕСКОП

Радиотелескоп является основным инструментом для радиоастрономических исследований. Под радиотелескопом понимается весь радиоастрономический комплекс, состоящий из антенны, радиометра и регистратора. При этом важнейшим его элементом является радиоастрономическая антенна. Имеющееся разнообразие радиотелескопов в основном определяется конструкцией радиоастрономических антенн. В метровом диапазоне волн наиболее эффективными являются так называемые многоэлементные антенные решетки с электрически управляемой диаграммой направленности. В электрическом отношении они сложнее параболических зеркальных антенн, но проще по механической конструкции и позволяют создать сколь угодно большую собирающую площадь антенны, а значит, обеспечивают высокую чувствительность радиотелескопа. Еще более ценным свойством таких антенн является принципиальная возможность создания многолучевой диаграммы направленности. Таким, в частности, является радиотелескоп метровых волн БСА (Большая Синфазная Антенна) ФИАН [14-16], построенный на основе двумерной многоэлементной синфазной антенной решетке.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

В эксплуатацию радиотелескоп был введен в 1974 году. Первоначально рабочий диапазон радиотелескопа составлял  $102.5 \pm 1.5$  МГц. С начала 90 - х годов этот участок частот был плотно заселен регулярным УКВ радиовещанием. Поэтому в 1999 году радиотелескоп без существенных конструктивных изменений был перестроен на частоту 111 МГц.

Антенна радиотелескопа БСА ФИАН – это плоская антенная решетка из волновых вибраторов, настроенных на волну 3 метра. Конструктивно антенна представляет собой плоский проволочный экран размером  $384 \times 187$  метров в направлении Север-Юг и Восток-Запад соответственно, над которым расположены 16384 диполя, образующих 256 рядов из 64 диполей в каждом ряду. Ряды и диполи в них ориентированы в направлении Восток – Запад.

Для формирования диаграммы направленности антенны БСА применена двухуровневая система фазирования. Все 256 рядов диполей разделены на 16 секций по 16 рядов в каждой секции. Расстояние между рядами  $d = 1.5$  м. Первый уровень фазирования представляет собой двоичную схему фазирования рядов диполей внутри каждой секции - так называемое внутрисекционное сканирование. Здесь формируется диаграмма направленности одной секции, соответствующая ее геометрическим размерам  $24 \times 187$  м. Ширина диаграммы направленности по склонению (в Н – плоскости), определяемая линейным размером 24 м, в среднем равна  $7^\circ$ . Диаграмма направленности каждой секции управляется по склонению в пределах диаграммы одного ряда (одного диполя) посредством дискретных фазовращателей. Далее сигнал от каждой из этих секций по магистральному высокочастотному фидеру поступает на второй уровень фазирования, на так называемую матрицу Батлера, имеющую 16 входов и 16 выходов. Здесь формируется 16-ти лучевая диаграмма направленности антенны БСА. Каждому выходу

фазирующей матрицы соответствует один луч – диаграмма направленности полной антенны БСА.

#### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАБЛЮДЕНИЯМ В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Ясно, что для реализации обсуждаемого прогнозирования необходимы прогностические  $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений. Главные требования к таким картам следующие:

- Карты должны быть полноразмерными. Их общий размер должен быть равен (желательно даже процентов на 20 больше) размеру функционального пространства. В нашем случае это, примерно, размер внутренней гелиосферы, 1 - 1.2 астрономическая единица в радиусе от Солнца.
- Карты должны быть ежедневными (оперативными), поскольку время развития межпланетных событий мало, составляет 1 – 3 суток.
- Масштаб карт должен позволять уверенно фиксировать положение фронта межпланетного возмущения в пределах порядка 0.1 а. е.
- И, естественно, карты должны быть надежны, без больших сомнительных и пустых мест.

Из этого следуют условия для режима наблюдений межпланетных мерцаний: ежедневно должны наблюдаться (и оперативно обрабатываться) около 150 мерцающих радиоисточников (примерно 300 источников в сутки) равномерно рассеянных по небу в пределах склонений от  $-10$  до  $+70$  градусов. Это условие диктуется в первую очередь требованием надежности  $\Delta m$ -карт, хотя радиотелескоп БСА в современном состоянии, в принципе, позволяет наблюдать, на уровне его предельной чувствительности ( $5\sigma$  от уровня аппаратных шумов и флуктуаций фонового излучения неба), порядка 10000 мерцающих источников. Не вдаваясь в подробности, заметим, что эти условия подсказаны в первую очередь опытом всех наших прежних серий наблюдений межпланетных мерцаний.

К сожалению, антенна радиотелескопа БСА в её начальном базовом исполнении не может обеспечить такой режим наблюдений. Возможен только однолучевой однопользовательский режим наблюдений и, в результате, необходимо распределение наблюдательного времени между пользователями.

Заметим, кстати, что это общая проблема пользования крупными радиотелескопами. Известно, что любая научная задача требует определенного наблюдательного времени на радиотелескопе. В этом смысле условно их можно разделить на два класса: задачи кратковременные, наблюдательное достаточное время которых исчисляется минутами и задачи долговременные, необходимое время непрерывных наблюдений которых составляет многие часы, дни, месяцы или даже годы. Причем, большинство задач второго класса не возобновляемы, информация не восстанавливается последующими наблюдениями. Такими, в частности, являются и радиоастрономические исследования солнечного ветра методом картографирования индексов мерцаний. Особенно это важно для исследований крупномасштабной, неоднородной структуры солнечного ветра. Еще в большей степени все сказанное относится к обсуждаемой здесь задаче прогнозирования космической погоды. Для ее решения необходим мониторинг межпланетной плазмы посредством надежных, длительных и непрерывных наблюдений большого числа космических радиоисточников, просвечивающих окрестности Солнца в пределах всех видимых гелиоцентрических расстояний, широт и долгот. Но ясно, что непрерывность и длительность наблюдений не оставляет места для других наблюдений и, в частности, для основного пользователя, многочисленных задач вышеназванного первого класса. Оптимальный выход из такой ситуации – привлечение резервов имеющихся в

конструкциях любых радиотелескопов. Особенно большой неиспользованный потенциал имеют радиотелескопы, построенные на основе антенн типа БСА.

#### ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БСА КАК АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Главной конструктивной особенностью БСА как антенной решетки является большое количество ее составных элементов (16384 диполей). Именно эта особенность антенных решеток обеспечивает формирование и неинерционное электрическое (не механическое) изменение их диаграмм направленности в очень широких пределах, от – один луч и одно направление, до –  $N$  лучей и  $N$  направлений ( $N$  - число элементарных излучателей) в границах диаграммы направленности элементарного излучателя. На данный момент антенна БСА работает как одномерная решетка из 16 элементов (16 секций) и формирует соответственно 16-ти лучевую диаграмму направленности. Однако в действительности антенна БСА является двумерной решеткой и в ней, в принципе, может быть сформирована двумерная многолучевая диаграмма направленности ( $256 \times 64$  основных лучей). Такая диаграмма направленности, в принципе, позволила бы вести наблюдения одновременно всей, видимой с Земли, части неба. Ясно, что информативность таких наблюдений возросла бы неизмеримо по сравнению с современными наблюдениями на БСА. Очевидно и то, что реализовать предельные возможности БСА (как и любой подобной антенной решетки) в современных условиях сложно. Однако, конструктивные особенности антенных решеток позволяют это делать поэтапно, соизмеряя этапы с реальными возможностями.

Наряду с многолучевой диаграммой направленности исключительные возможности для повышения эффективности работы радиотелескопа дает применение современной вычислительной техники. Радиотелескоп на основе антенной решетки очень хорошо приспособлен для внедрения полной автоматизации его работы от управления всеми операциями в процессе наблюдений до организации долговременного надежного хранения и свободного неограниченного доступа пользователей к наблюдательной информации. Современный уровень вычислительной техники и динамика его развития уже сейчас дают такую возможность.

Здесь рассмотрены два основных резерва существенного повышения эффективности радиотелескопов – непрерывные многолучевые наблюдения широкой области неба и хранение исходной, наблюдательной информации при свободном, совместном ее использовании. Можно представить, какие неограниченные возможности радиоастрономических наблюдений открывает внедрение такого режима работы радиотелескопа. Фактически любой пользователь получает возможность «вести наблюдения» не только в настоящем и будущем, но и в прошлом времени. Естественно, что и задача исследований крупномасштабной структуры солнечного ветра, и обсуждаемая здесь задача прогнозирования получают при этом полную возможность для их реализации.

Добавим, что радиотелескоп на основе многоэлементной антенной решетки, кроме названных особенностей, имеет целый ряд дополнительных практических преимуществ. В частности, такой радиотелескоп допускает модернизацию, без прекращения текущей его работы, не нарушая процесс проводимых на нем радиоастрономических наблюдений.

#### РЕАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА БСА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Вопрос о возможности свободного использования радиотелескопа БСА для различных научных задач возник одновременно с началом его функционирования. Уже первые научные наблюдения в непрерывном режиме по поиску новых пульсаров исключали возможность постановки других наблюдений. Справедливости ради заметим, что еще при обосновании данного варианта антенны БСА отмечалось [14], что при



использовании многоэлементной решетки можно получить многолучевую диаграмму направленности в телесном угле. Отмечалось также, что это, в частности, позволит значительно увеличить скорость съема информации, получать радио изображения протяженных источников, увеличить время экспозиции при слежении за источниками при проведении обзорных наблюдений и т.д. Отмечалось, наконец, что для многоэлементной решетки нет принципиальных затруднений в получении линейной или прямоугольной матрицы лучей и что системы с многолучевыми диаграммами направленности могут оказаться весьма перспективными для решения многих задач. Реально же в антенне БСА был сформирован практически одноканальный (однолучевой) режим наблюдений. Причина в том, что формирование диаграммы направленности и изменение её положения производится с помощью так называемых фазовращателей посредством переключения задержек (соответствующих отрезков кабеля) в соединительных линиях отдельных рядов и секций антенны. В результате, в каждый данный момент времени луч зрения радиотелескопа установлен в одном определенном направлении для одной конкретной наблюдательной задачи. Особенно остро потребность независимого пользования антенной БСА возникла после наших выводов о необходимости непрерывных длительных наблюдений для исследования крупномасштабных неоднородностей в солнечном ветре и возможности прогнозирования геомагнитной активности по наблюдениям межпланетных мерцаний. Позднее аналогичные требования возникли у других задач, особенно у задач длительного, обзорного характера. В результате, в 2000 году был сделан первый важный шаг по пути повышения эффективности радиотелескопа, была создана вторая диаграмму образующая схема антенны БСА [17] с управлением, независимым от первой диаграммы. В ней применена такая же, как и в первом варианте БСА, двухуровневая система фазирования, но вместо фазовращателей для формирования диаграммы направленности каждой из 16-ти секций используются унифицированные матрицы Батлера  $16 \times 16$ . В результате, формируется 16 постоянных диаграмм направленности каждой секции антенны, суммарно перекрывающие в центральном меридиане весь сектор обзора от горизонта до горизонта. Каждому выходу матрицы соответствует одна из 16-ти диаграмм направленности. К сожалению, была применена коммутационная схема подключения к этим выходам, смонтированная внутри фазирующих матриц, реализующая практически только однозадачный вариант пользования радиотелескопом.

Поскольку и в этом варианте проведение непрерывных ежедневных наблюдений невозможно, мы предложили довести до логического завершения замысел повышения эффективности, а именно, создать многопользовательский многолучевой радиотелескоп на основе второй диаграмму образующей схемы антенны БСА. Понятие «многопользовательский» предполагает возможность одновременного пользования радиотелескопом неограниченному числу пользователей. Понятие «многолучевой» предполагает максимально возможный сектор обзора радиотелескопа. Очевидно, что для этого необходимо вместо коммутатора, выбирающего тот или иной выход матрицы (ту или иную диаграмму направленности всех секций антенны) постоянно использовать все 16 выходов от всех 16-ти секционных матриц (см. рис. 9). Далее, также используя унифицированные матрицы Батлера  $16 \times 16$ , получим в пределах каждой секционной диаграммы по 16 узких диаграмм (лучей) полной антенны БСА. Таким образом, можно сформировать 256-ти лучевую в плоскости центрального меридиана диаграмму направленности антенны БСА. В результате появится возможность не только предоставить все эти 256 сигнальных выходов антенны одновременно для всех пользователей без ограничений, но и возможность создать на этой основе базовый многопользовательский радиотелескоп с долговременным хранением и свободным неограниченным доступом пользователей к полной наблюдательной информации.

Для нашей задачи прогнозирования геомагнитной активности необходимо наблюдать мерцающие радиоисточники, рассеянные по небу в пределах склонений от  $-10$  до  $+70$  градусов. Средняя ширина диаграммы направленности каждой секции антенны на

этих склонениях составляет примерно 8 градусов. Следовательно, для нашей задачи необходимо постоянно использовать 10 соответствующих диаграмм направленности. Таким образом, для наших наблюдений для перекрытия необходимого сектора обзора (80 градусов по склонению) будет достаточно иметь 160 лучей (сигнальных выходов) антенны БСА.

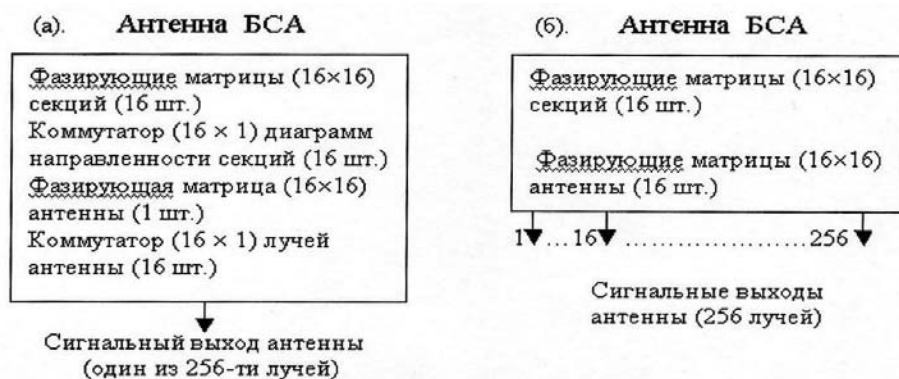


Рис. 9. Варианты функционирования радиотелескопа БСА:  
 (а) – существующий (однопользовательский),  
 (б) – предлагаемый (многопользовательский).

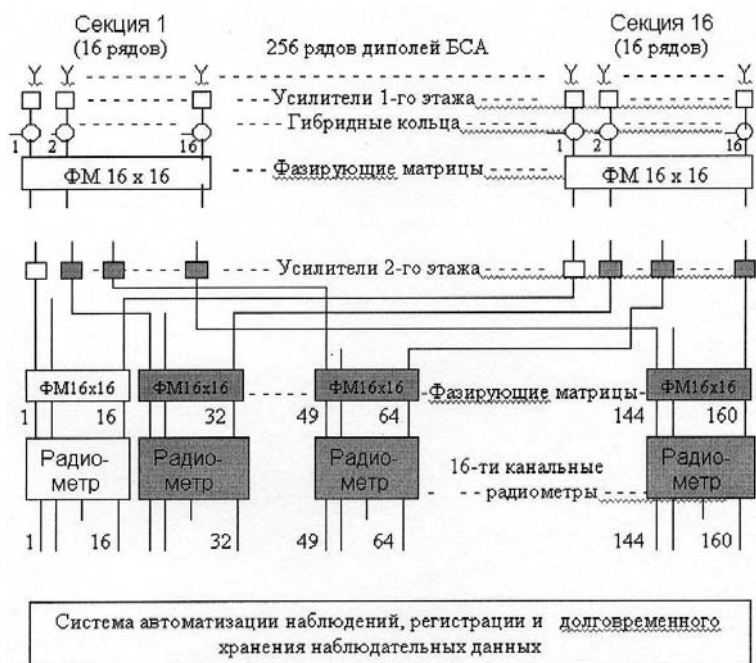


Рис. 10. Структурная схема 160-ти-лучевого радиотелескопа БСА для радиоастрономического мониторинга межпланетной среды.

Структурная схема 160-ти лучевого радиотелескопа БСА для радиоастрономического мониторинга межпланетной среды приведена на рис. 10. Тёмным на схеме выделены узлы, которые необходимо реализовать для этого радиотелескопа.

Заметим кстати, что из сказанного вытекает естественное общее требование некоммутируемой схемы такого типа радиоастрономических антенн и универсальной схемы размножения сигнала на всех выходах антенны.

## МАКЕТИРОВАНИЕ, ОТЛАДКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ (ОТ РАДИОТЕЛЕСКОПА ДО ПРОГНОЗА)

Любое новое большое дело предварительно должно быть тщательно подготовлено вплоть до рабочих макетных испытаний и отладки его рабочего образца. Для наших наблюдений межпланетных мерцаний в целях прогнозирования геофизических возмущений, в принципе, достаточно иметь упомянутые 160 сигнальных выходов антенны БСА. При некоторых допустимых ограничениях, на этой основе вполне можно сформировать специализированный радиотелескоп, обеспечивающий такие наблюдения. Однако, во всех отношениях, более правильным представляется создание многопользовательского радиотелескопа, на совместной, коллективной основе.

В 2002 году нами был создан рабочий макет базового автоматизированного радиотелескопа в 16-ти лучевом исполнении антенны БСА [18], как основа для создания многопользовательского многолучевого радиотелескопа БСА ФИАН. Разносторонние испытания макета такого радиотелескопа в режиме непрерывных (мониторинговых) наблюдений мерцающих радиоисточников показали, что заметно повышается информативность научных программ наблюдений, как в пространственном, так и временном исчислении. Кроме того, у радиотелескопа появляются большие возможности для «самоанализа», для непрерывного контроля его рабочего состояния, недоступные в режиме однолучевых наблюдений, но очень важные для практики. Продолжительное время с момента создания макет использовался в диагностических целях при различных технических работах на антенне БСА. Однако, кроме макетирования радиотелескопа, важно также получить макетные испытания всего процесса, от наблюдений до прогноза, т.е. реально проработать весь процесс прогнозирования. К сожалению, коммутационный вариант работы всей антенны допускает только однопользовательский режим наблюдений. Поэтому сейчас для таких макетных наблюдений мы используем 9 сигнальных выходов одной секции (1/16 часть) антенны. Это позволяет наблюдать радиоисточники одновременно в секторе неба от  $-5$  до  $65$  градусов по склонению. Такие макетные наблюдения сейчас ведутся в непрерывном (мониторинговом) режиме. При этом, конечно, значительно падает чувствительность и значит число наблюдаемых мерцающих радиоисточников, но появляется возможность наблюдений практически всей необходимой области неба. Чувствительность постепенно можно будет повышать путем суммирования по интенсивности низкочастотных выходных сигналов отдельных секций, не изменяя при этом их диаграмм направленности. Пробная проверка суммирования сигналов от двух секций в одной диаграмме направленности строго подтвердила расчетное увеличение чувствительности и реальное уменьшение влияния радиопомех. Такие макетные наблюдения позволяют, в частности, оценить степень надежности получения  $\Delta m$ -карт межпланетных возмущений под влиянием наземных радиопомех, солнечных шумовых бурь, ионосферных мерцаний, погодных условий и т.д. Кроме того, это позволит отладить методику получения и форму представления прогностической информации. И, наконец, мы рассчитываем на основе таких макетных наблюдений, не ожидая реализации варианта полномасштабного многопользовательского радиотелескопа, начать пробное прогнозирование геофизической активности уже в начале выхода из фазы текущего минимума солнечной активности.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе многолетнего опыта наблюдений мерцаний большого числа космических радиоисточников, учитывая упомянутые вопросы и проблемы, мы можем утверждать, что радиоастрономический метод картографирования межпланетной плазмы наряду с другими методами может быть эффективно использован для прогнозирования «космической погоды». Основными радиоастрономическими данными для такого

прогнозирования являются  $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений. При этом ключевыми являются параметры крупномасштабных возмущений, выявляемые на  $\Delta m$ -картах:

- угловые размеры межпланетных возмущений
- направление их распространения
- скорость фронта
- транспортное время прихода к Земле

Основным требованием для получения  $\Delta m$ -карт является возможность непрерывных наблюдений межпланетных мерцаний по всему небу от  $-10$  до  $+70$  (для наших широт) градусов по склонению. Главным на сегодняшний день и, по-видимому, единственным препятствием для постановки такого прогнозирования является отсутствие радиотелескопа для проведения необходимых наблюдений. Наиболее эффективным для таких наблюдений и одновременно совместимым с потребностями других научных задач является многолучевой радиотелескоп на основе антенной решетки метрового диапазона волн. Радиотелескоп БСА ФИАН в принципе хорошо отвечает таким требованиям. Поэтому сейчас объединёнными усилиями Российской академии наук (РАН) и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу природной среды в Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра Физического института РАН (ПРАО АКЦ ФИ РАН) развернуты работы по технической модернизации БСА ФИАН. Их результатом, в целом, должно быть повышение эффективности использования БСА и, в частности, обеспечение прогностической информации.

Модернизация ведётся за счет средств из Федеральной целевой программы "Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008 - 2015 годы", по договору с Институтом прикладной геофизики (ИПГ) по теме: "Разработка приемной аппаратуры для обеспечения возможности проведения регулярных наблюдений межпланетных мерцаний на радиоастрономическом комплексе ПРАО АКЦ ФИ РАН", в рамках выполняемого ИПГ Государственного контракта "Разработка дополнительной аппаратуры для дооснащения действующих оптических и радиотелескопов с целью обеспечения их работы в режиме мониторинга гелиогеофизической обстановки".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В. И. Радиоизображения межпланетной турбулентной плазмы // Астрон. журнал, 1979, Т. 56, №1, С. 96
2. Власов В. И. О возможности прогнозирования геофизической активности по межпланетным мерцаниям радиоисточников // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. № 3. С. 441-444
3. Власов В. И. Корреляционный анализ вариаций индексов межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и Аэрономия. 1982. Т. 22. № 4. С. 536-542
4. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 2. С. 254-258
5. Hewish A. and Duffett-Smith P. J. A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers // Planet. Space Sci. 1987. V. 35. P. 487-491
6. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. № 3. С. 401-424
7. Gotwols B. L., Mitchell D. G., Roelof E. C., Cronin W. M., Shawhan S. D., Erickson W. C. (Нормированный индекс мерцаний, полученный по 46 мерцающим источникам на 34.3 МГц) // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. A9. P. 4200-4206
8. Armstrong J. W., Coles W. A. Interplanetary scintillations of PSR 0531+21 at 74 MHz // Astrophys. J. 1978. V. 220. P. 346-352
9. Cohen M. H., Gundersman E. J., Harris D. E. New limits in the diameters of radio sources // Astrophys. Journal. 1967. V. 150. P. 767-783

10. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. О крупномасштабной структуре межпланетной плазмы // Письма в Астрон. журнал. 1976. Т. 2, № 5. С. 248-250
11. Власов В. И. Карты межпланетной плазмы по наблюдениям в Августе-Октябре 1979 года // Препринт ФИАН. 1980. № 114. С. 1-20
12. Власов В. И. Скорость межпланетных ударных волн по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и Аэрономия. 1988. Т. 28. № 1. С. 1-8
13. Vitkevitch V. V. Scattering and scintillations of discrete radio sources as a measure of the interplanetary plasma irregularities // Solar-Terrestrial Symposium, D. Reidel, Dordrecht. 1971. P. 49-66
14. Виткевич В. В., Илясов Ю. П., Кутузов С. М. Радиотелескоп метрового диапазона волн с заполненной апертурой. Известия ВУЗ. РАДИОФИЗИКА. 1973. Т. 16. № 12. 1904-1908
15. Кутузов С. М., Илясов Ю. П., Глушаев А. А. Антенные системы радиотелескопа БСА ФИАН. Известия ВУЗ. РАДИОФИЗИКА. 1976. Т. 19. № 11. С. 1607-1613
16. Виткевич В. В. и др. Известия ВУЗ. РАДИОФИЗИКА. 1976. Т. 19. С. 1594
17. Азаренков Ю. И., Дагкесаманский Р. Д., Кутузов С. М. и др. Вторая многолучевая диаграмма направленности на радиотелескопе БСА ФИАН, Всероссийская астрономическая конференция. Тез. докл. СПб.: НИИХ СПбГУ. 2001. С. 6.
18. Власов В. И., Алексеев В. Н., Исаев Е. А., Иванов Б. И., Лапаев К. А., Логвиненко С. В., Соин А. Г. БАРТм16 - БСА (Базовый автоматизированный радиотелескоп многопользовательский на основе 16-ти лучевой диаграммы антенны БСА – рабочий макет) // Препринт ФИАН. 2002. № 31. С. 1-28
19. Власов В. И., Шишов В. И., Извеков Б. К., Исаев Е. А., Кутузов С. М., Соин А. Г., Азаренков Ю. И., Иванов Б. И., Костромин В. И., Мазурин И. Г., Соломин Н. С., Суринов С. П. Крупномасштабные возмущения в межпланетной плазме: метод исследования, аппаратура, результаты // Труды ФИАН. 2002. Т. 229. С. 185-216.
20. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Структура распространяющихся возмущений межпланетной плазмы // Геомагнетизм и аэрономия, 1985. Т. 24, № 4. С. 541-545
21. Борог В. В. Мюонная томография – новый метод дистанционного мониторинга гелиосферы и атмосферы Земли // Сб. Трудов III Всерос. Научн. Конференции «Физические проблемы экологии». М. МГУ. 2001. Т. 7. С. 5.

## Эффективность процесса долгосрочного прогноза данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы

Ю. К. Калинин, В. И. Денисова

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: kalinplat@rambler.ru*

Введено понятие эффективности модели ионосферы в контексте долгосрочного прогнозирования величин  $f_0F2$  и МПЧ –  $F2$ . В основе понятия лежит сопоставление модельной суточной изменчивости этих величин с данными наклонного зондирования на различных трассах. Проведено сопоставление эффективности моделей ионосферы по данным ИПГ и IRI с данными эксперимента по наклонному зондированию на различных трассах. В большинстве рассмотренных случаев эффективность моделей примерно одинакова.

Ключевые слова: эффективность моделей ионосферы, долгосрочное прогнозирование, суточная изменчивость, наклонное зондирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочный прогноз данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы связан с использованием той или иной модели  $N_e(h)$  – профиля на радиотрассе. Ниже используются данные главным образом двух моделей: долгосрочного прогноза МПЧ [1] и модели IRI [2]. При этом характеристики эффективности формируются на основе выборочного сравнения суточных экспериментальных данных об изменчивости  $f_0F2$  (станция ВЗ Якутск) и величины МПЧ –  $F2 - D_i$ , где  $i$  – длина соответствующих трасс, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Название трассы	Длина, км.	Дата измерения
Ростов - Великобритания	3000	Март 2004 г.
Москва - Великобритания	2900	Март 2003 г.
Москва - о. Хейса	2958	Март 1976 г.; Июнь 1976 г.; Сентябрь 1976 г.; Декабрь 1976 г.
Москва - Диксон	2859	Март 1976 г.; Июнь 1976 г.; Сентябрь 1976 г.; Декабрь 1976 г.
Иркутск (Торы) - Норильск	2088	26 марта 2006 г.; 27 марта 2006 г.
Иркутск (Торы) - Магадан	3034	26 марта 2006 г.; 27 марта 2006 г.
Иркутск (Торы) - Хабаровск	2297	11 марта 2004 г.; 12 марта 2004 г. 13 марта 2004 г.; 30 марта 2004 г.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТРАСС НЗ

Геометрия радиотрасс представлена на рисунке 1.

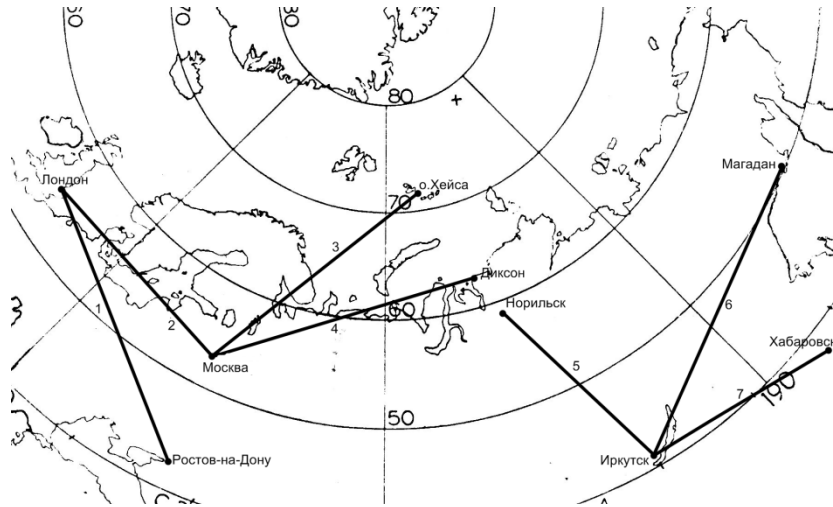


Рис. 1. Геометрия радиотрасс НЗ ионосферы, данные которых использованы для оценки эффективности прогноза МПЧ

Естественно определить эффективность  $\mathcal{E}$  как положительную величину, находящуюся в пределах  $[0;1]$ .

Или

$$0 \leq \mathcal{E} \leq 1 \quad (1)$$

Далее следует ввести обозначения

$$\mathcal{E} = 1 - \Delta, \quad (2)$$

где уменьшение эффективности определяется как величина, характеризующаяся суперпозицией детерминированных и случайных явлений. Такой подход обуславливается видом суточной изменчивости величин  $f_0F2(t)$  и МПЧ –  $F2 - D_i(t)$  в различных гелиогеофизических ситуациях [3]. Следует ввести в рассмотрение величину относительной изменчивости  $X$  и  $Y$  частот  $f_0F2$  и МПЧ –  $F2 - D_i$ .

$$x = \frac{(f_0F2)_{\mathcal{E}} - (f_0F2)_M}{(f_0F2)_{\mathcal{E}}} \quad (3)$$

$$y = \frac{(\text{МПЧ} - F2 - D_i)_{\mathcal{E}} - (\text{МПЧ} - F2 - D_i)_M}{(\text{МПЧ} - F2 - D_i)_{\mathcal{E}}}, \quad (4)$$

где  $i$  – номер трассы из таблицы 1.

Здесь субиндекс « $\mathcal{E}$ » обозначает данные эксперимента, субиндекс « $M$ » - данные модельного прогноза. Определим  $\Delta\mathcal{E}$  как величину, квадрат которой является линейной формой от среднесуточных значений  $\bar{x}^2$ , дисперсии  $D_x$ , эксцесса  $E_x$ . Аналогичным образом для величины  $y$ . Т.е.

$$\Delta\mathcal{E}_x = \sqrt{(\bar{x})^2 + D_x + \alpha A_x^2 + \beta E_x} \quad (5)$$

$$\Delta\mathcal{E}_y = \sqrt{(\bar{y})^2 + D_y + \alpha A_y^2 + \beta E_y} \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) величины, стоящие справа, рассматриваются как выборочные по 24 суточным ежечасным измерениям.

В некоторых случаях результаты НЗ представлены в виде медиальных значений по совокупности суток, относящихся к тому или иному месяцу. Тогда суточные зависимости  $(МПЧ - D)_{med}(t)$  следует трактовать как квазидетерминированные и формула (6) принимает вид:

$$\Delta \mathcal{E}_y = |\vec{y}| \quad (7)$$

Переходя к экспериментальным данным, следует, прежде всего, использовать результаты, приведенные в работе [4]. На рис. 2 приведены зависимости  $f_oF2$  за трое суток по станции ВЗ Якутск.

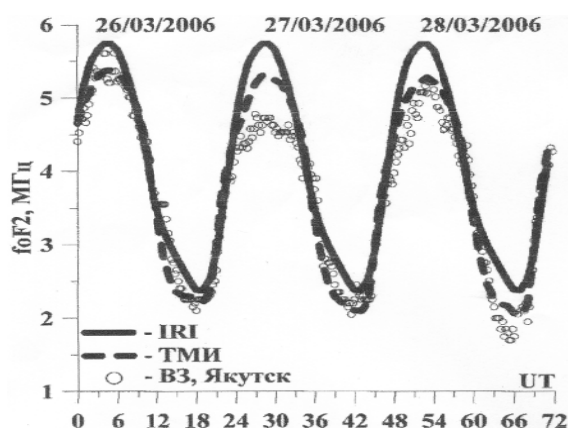


Рис 2. Данные величины  $f_oF2$  по станции ВЗ Якутск.

Результаты расчетов эффективности долгосрочных прогнозов по формуле (3) при  $\alpha = \beta = 0$  приведены в таблице 2

Таблица 2

Эффективность долгосрочного прогноза  $f_oF2$

Дата	26.03.2006	27.03.2006	28.03.2006
Модель IRI	0,92	0,83	0,78
Модель ДП	0,83	0,74	0,72

Из данных таблицы 2 очевидно, что, хотя имеется некоторое превышение  $\mathcal{E}_{IRI}$  по сравнению с  $\mathcal{E}_{ДП}$ , его величина не превышает 10 % и едва ли может считаться значимой.

На рисунках 3 - 6 приведены данные для трасс Москва - Диксон и Москва - о.Хейс в виде суточного хода экспериментальных медиальных значений  $МПЧ - F2 - D_i$  и расчетных значений этих величин. Результаты расчетов для  $\mathcal{E}$  по формуле (7) на приполярных трассах представлены в таблице 3.

Таблица 3

Месяц/1976 г.	Март	Июнь	Сентябрь	Декабрь
Москва - Диксон	0,7	0,9	0,9	0,8
Москва - Хейс	0,8	0,85	0,83	0,7



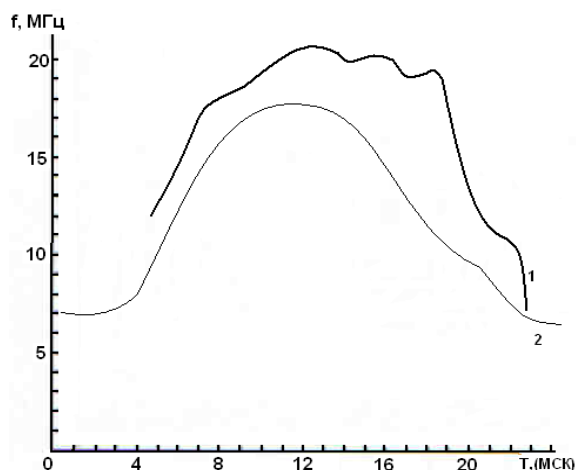


Рис. 3. Москва - Диксон (март 1976 г.)

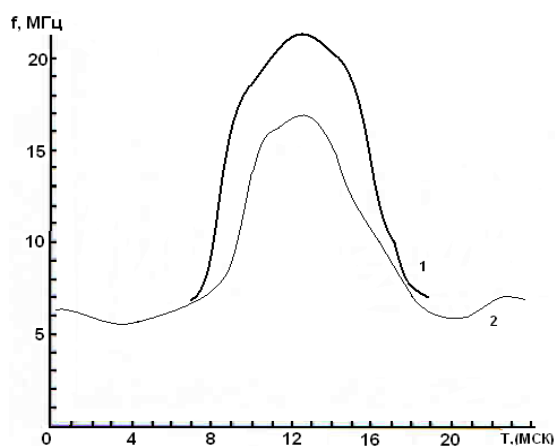


Рис. 4. Москва - Диксон (сентябрь 1976 г.)

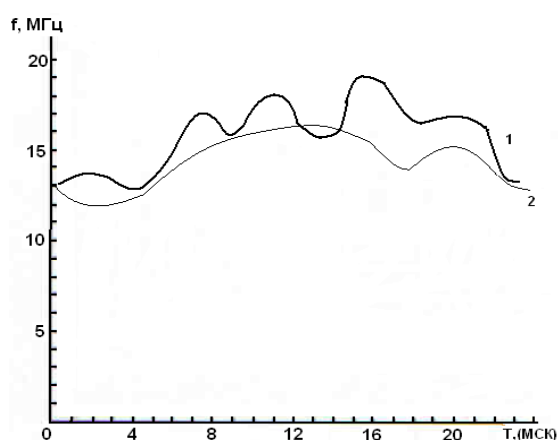


Рис. 5. Москва - о.Хейс (июнь 1976 г.)

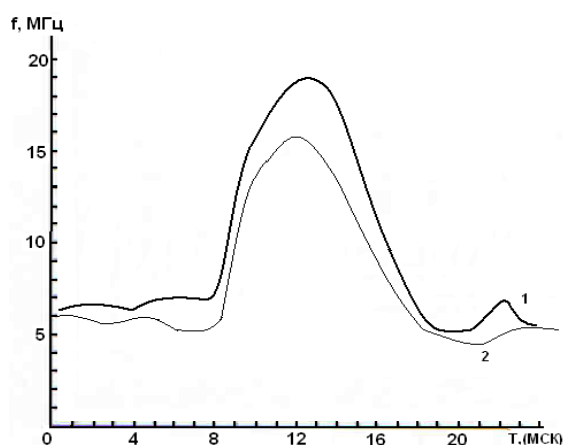


Рис. 6. Москва - о.Хейс (декабрь 1976 г.)

Для трасс Магадан - Торы и Норильск - Торы имеются данные суточного хода МПЧ –  $F2 - D_i$ . Результаты расчета Э для моделей IRI и ДП за 26.03.06 и 27.03.06 приведены в таблице 4.

Таблица 4

Эффективность/Даты	Магадан - Торы		Норильск - Торы	
	IRI	ДП	IRI	ДП
26.03.2006 г.	0,88	0,78	0,74	0,7
27.03.2006 г.	0,83	0,83	0,76	0,79

Эти данные, полученные в спокойных условиях ( $K_p < 4$  и  $X_{zay}F_{lux} < 105$  ватт/м<sup>2</sup>), свидетельствуют о близости значений Э для моделей IRI и ДП.

Следует также указать на данные по трассе Москва - Лондон (март 2003 г.). Зависимость МПЧ<sub>3</sub> представлена на рисунке 7.

Вместе с тем данные [1] дают для полуденного значения МПЧ –  $F2 - 3000 \approx 30$  МГц и для полуночного  $\approx 10$  МГц. Это приводит к значению Э  $\approx 0,8$ .

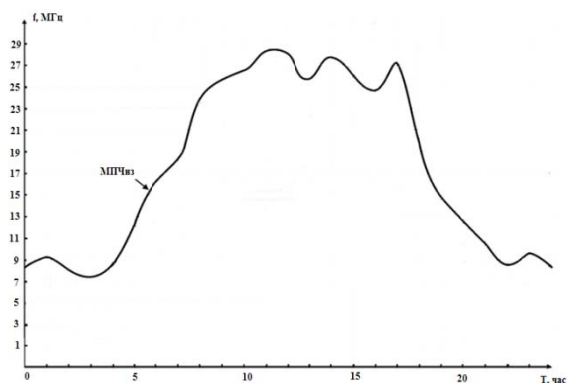


Рис. 7. Суточный ход МПЧ – F2 4000 на трассе Москва - Лондон

Представляют интерес значения  $\mathcal{E}$  на эталонной трассе Норильск – Иркутск, полученные 23.03.95 и 14.09.94 г. – рис. 8, а также данные, полученные 18.10.95 и 19.10.95 [4].

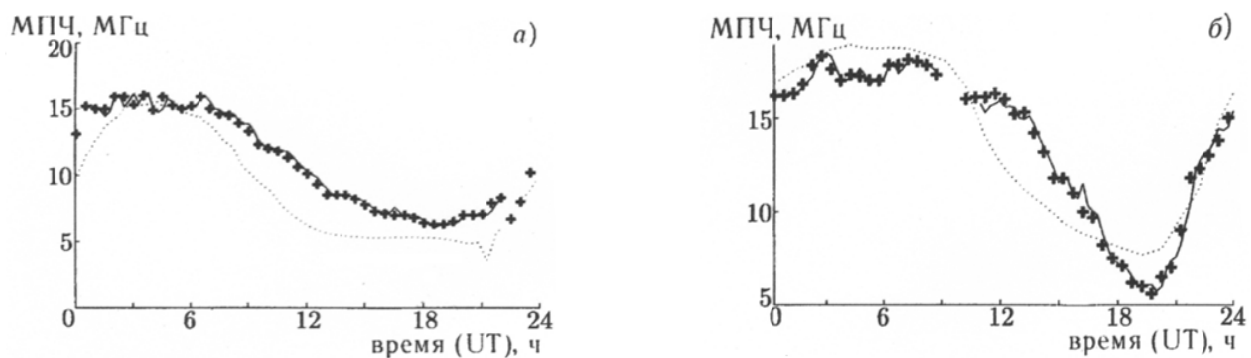


Рис. 8. Суточный ход МПЧ долгосрочного и оперативного прогнозов для 23.03.95 г. (а) и 14.09.94 г. (б): пунктирная линия - долгосрочный прогноз, точки (+) - экспериментальные данные.

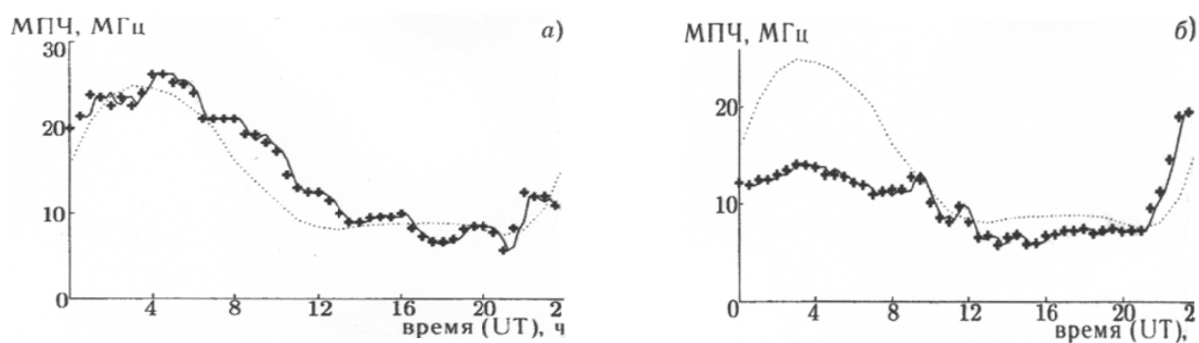


Рис. 9. Суточный ход наблюдаемых (+) МПЧ для 18.10.95 г. (а) и 19.10.95 г. (б). Пунктирная линия - ход МПЧ по долгосрочному прогнозу.

Результаты расчета  $\mathcal{E}$  представлены в таблице 5.

Таблица 5

Даты	23.03.95 г.	23.03.95 г.	18.10.95 г.	19.10.95 г.
$\mathcal{E}$	0,8	0,96	0,89	0,7

Приведенные выше примеры относятся к суточной изменчивости гелиогеофизических условий. Значения  $\mathcal{E}$ , полученные по различным моделям для различных трасс, не сильно различаются между собой и заключены в пределах 0,7 - 0,9.

Представляют определенный интерес значения третьего и четвертого статистического инвариантов  $A_y$  и  $E_y$  – асимметрии и эксцесса суточных вариаций относительно разности между прогнозируемых сглаженных значений и выборочных суточных значений МПЧ -  $F2 - D_i$ . Такие расчеты были приведены для трасс НЗ Магадан - Торы и Норильск - Торы для данных, полученных 26.03.06 г. и 27.03.06 г.

Результаты расчетов  $A$  и  $E$  по стандартным формулам [5] представлены в таблице 6.

Таблица 6

	IRI		ДП	
	$A$	$E$	$A$	$E$
Магадан - Торы				
26.03.2006 г.	1,09	-0,30	0,81	-0,5
27.03.2006 г.	0,94	-0,38	0,35	-0,8
Норильск - Торы				
26.03.2006 г.	-0,4	1,42	0,13	0,53
27.03.2006 г.	1,5	0,53	0,26	-0,7

На рисунке 10 приведены значения  $A$  и  $E$  из таблицы 5.

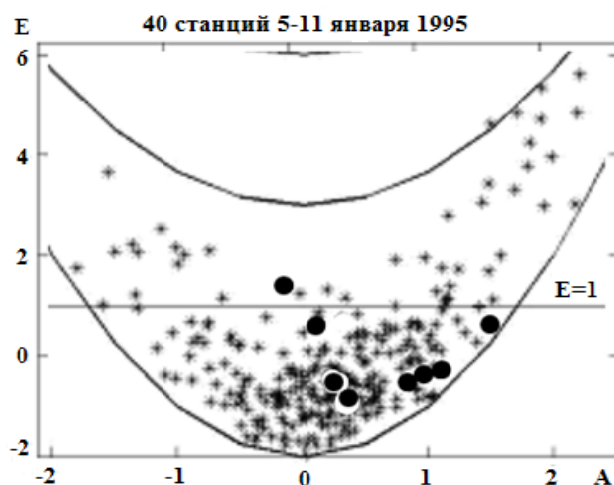


Рис. 10. Значение  $A$  и  $E$  из таблицы 5 (черные кружочки) на фоне «облака» точек  $A$  и  $E$  для относительных вариаций  $f_0F2$  по мировой сети станций 5 - 11 января 1995 г.

Представлены на плоскости  $A$  и  $E$  на фоне «облака» точек (крестики), соответствующего выборочным суточным значениям относительной вариации  $f_0F2$  на мировой сети АИС, полученные 5 - 11 января 1995 г. [7] Данные рис. 10 свидетельствуют о том, что два вида статистики – множества  $\{\mathcal{E}\}$  и множество  $\{\delta f_0F2\}$  относятся к одному классу.

Следует также привести пример, когда величина  $\mathcal{E}$  аномально низка, как об этом свидетельствуют данные НЗ (эксперимент и прогноз) для трассы Хабаровск - Торы, март 2004 г. [6]. Результаты расчета представлены в таблице 7.

Результаты расчета эффективности для трассы Хабаровск - Торы, март 2004 г.

Даты	11.03.04 г.	12.03.04 г.	13.03.04 г.	30.03.04 г.
IRI	0,86	0,8	0,91	0,5
ДП	0,2	0,4	0,3	0,2

Как видно из таблицы 7, в этом случае имеет место падение эффективности  $\mathcal{E}_{дп}$  до уровня 0,2. При этом в период 11 - 30 марта 2004 г. величина  $K_p$  не поднималась выше уровня 0,4, а величина  $X_{zay}F_{lux}$  не превышала уровня  $10^{-4}$  ватт/м<sup>2</sup>. Этот случай должен быть предметом особого анализа (рассмотрение  $D_{st}$  вариаций, как это имело место на трассе Ростов - Великобритания, проверка станции с экспериментами и т.д.).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено понятие эффективности модели ионосферы в части долгосрочного прогнозирования величин  $f_0F2$  и МПЧ –  $F2$ . Аналитическое выражение для величины эффективности определяется как разность между единицей и функционалом простейшего вида от двух статистических инвариантов разности между множеством, принимаемым за эталон, и множеством, эффективность которого подлежит определению. Сопоставлены эффективности моделей в виде радиопрогнозов ИПГ и IRI. Сравнение произведено с данными наклонного зондирования на различных трассах. В большинстве рассмотренных случаев эффективность моделей примерно одинакова.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамовитц М., Стеган И. Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979.
2. Дзвонковская А. Л., Кузнецов В. А., Сергеев Н. П. Статистика относительных вариаций критической частоты области  $F2$  во время магнитных возмущений. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45. № 2, С. 1 - 4.
3. Ионосферно-магнитная служба: Сборник под редакцией Авдюшина С. И. и Данилова А. Д. - Л: Гидрометеиздат, 1987.
4. Котович Г. В., Грозов В. П., Ким А. Г., Ойнац А. В., Романова Е. Б., Тащилин А. В. Применение теоретической модели ионосферы для расчета характеристик трасс распространения дециметровых волн // Геомагнетизм и аэрономия. 2010, № 4.
5. Bilitza D. International Reference Ionosphere. 2000 Radio Sci., 36, 261, 2001.
6. Периодическое издание ИПГ Росгидромета «Долгосрочный прогноз МПЧ».
7. Рябова Н. В. Радиоканалы однолучевого распространения коротких волн и их технические характеристики // Труды IX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2003. Т.3., С. 955 - 964.

## **Сейсмогенные неоднородности области F2 ионосферы, обнаруженные наземными и спутниковой ионосферными станциями**

Ю. К. Калинин

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: kalinplat@rambler.ru*

Рассматриваются редкие события – пересечение траектории сейсмогенной одиночной макромасштабной ионосферной неоднородности и траектории ИСЗ «Интеркосмос - 1837», несущего ионосферную станцию. Показывается, что в этих случаях на ионограммах спутниковой станции обнаруживается специфический трек, происхождение которого объяснялось ранее гипотезой о наличии вблизи ИСЗ краевой части макромасштабной неоднородности положительного знака. В рассмотренных случаях появление специфического трека и сейсмогенной ионосферной неоднородности происходит в одной и той же области пространства-времени. Это подтверждает гипотезу о причинной связи между их появлениями. Приводятся некоторые оценки параметров сейсмогенных ионосферных неоднородностей. Формулируются новые гипотезы, вытекающие из анализа рассмотренных данных.

Ключевые слова: эффективность моделей ионосферы, долгосрочное прогнозирование, суточная изменчивость, наклонное зондирование.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Гипотеза о возникновении в области F2 сейсмогенных макромасштабных изолированных неоднородностей, по-видимому, впервые возникла в работе [1]. Авторы излагали результаты зондирования ионосферы после землетрясения на Аляске. Движение объекта в виде локального уменьшения электронной концентрации обнаружилось благодаря тому, что траектория его перемещения совпала с цепочкой наземных автоматических ионосферных станций (АИС), принадлежащей мировой сети. В статьях [2,3] были приведены результаты обработки экспериментальных данных, которые свидетельствовали в пользу гипотезы о возникновении в районе эпицентра на высоте главного максимума ионосферы – области F2 сейсмогенных макромасштабных неоднородностей с горизонтальными размерами  $\sim (1 - 4)$  тыс. км. Однако имело место существенное отличие от случая, рассмотренного в работе [1]. Были обнаружены объекты, возникающие за 10 – 15 часов до катастрофического землетрясения. Они характеризовались положительным отклонением электронной концентрации и скоростью движения 0,8 – 1,5 тыс.км./час. Ниже рассматриваются случаи наблюдения таких объектов двумя независимыми методами.

### **2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ**

Массивы относительных вариаций критической частоты области F2 ионосферы  $\{\delta f_0 F2\}$ , полученные на мировой сети АИС, обрабатывались по довольно простой методике. За несколько суток до и после момента землетрясения ( $M > 6$ ) строились

зависимости вариаций от времени  $\delta f_0 F2(t)$  для каждой АИС. После этого производилась двойная селекция визуально выделяемых одиночных положительных вариаций. На карте Мира положения таких АИС выделялись специальными знаками. Предметом дальнейшего поиска служили цепочки среди выделенных АИС, расположенных вблизи дуги большого круга. После этого производилось новое построение зависимостей  $\delta f_0 F2(t)$  друг под другом со сдвигом осей абсцисс на величину, пропорциональную расстоянию от АИС до эпицентра землетрясения. Предполагалось, что на таком комплексном графике локальные максимумы зависимостей  $\delta f_0 F2(t)$  располагаются тем позднее, чем больше расстояние от АИС до эпицентра землетрясения. Построение прямой, вокруг которой группируются максимумы, определяет среднюю скорость равномерно движущегося объекта. Экстраполяция прямой к временной оси абсцисс, соответствующей эпицентру, позволяет оценить время упреждения – интервал между появлением неоднородности и моментом главного удара. Подобным способом были обработаны десятки случаев. Это позволило оценить параметры обнаруженных объектов. Их примерно одинаковые продольные и поперечные горизонтальные размеры заключены в пределах 2 – 4 тыс. км. Величина  $\delta f_0 F2$  превышает 15 – 20 % (Известен случай, когда  $\delta f_0 F2 > 50\%$ ).

В 1999 г. с помощью АИС, располагавшейся на ИСЗ «Интеркосмос - 1837», было получено большое количество стандартных ионограмм. Однако, изредка на ионограммах регистрировался нестандартный трек. Так называемый задержанный нижний след (ЗНС), подробнее см. [4]. При этом возникла естественная гипотеза. Достаточно было предположить наличие в ионосфере макромасштабной неоднородности с конкретными параметрами её краевой области, чтобы методом геометрической оптики синтезировать нестандартный трек. В работе [5] это предположение было соотнесено к ситуации пересечения траектории ИСЗ с траекторией движения сейсмогенной неоднородности, обнаруженной с помощью цепочки наземных АИС. Следует опять-таки отметить, что обнаружение сейсмогенной ионосферной неоднородности является редким событием. Необходимо, чтобы траектория движения объекта совпадала с какой-либо цепочкой АИС, например, протяжённостью более радиуса Земли. Пересечение двух траекторий – одиночного сейсмогенного объекта и ИСЗ, когда они совмещаются в пространстве-времени, является ещё более редким событием. Известны только две таких достаточно ясных ситуации.

### 3. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 21 АПРЕЛЯ 1999 г.

Землетрясение состоялось в южной части Тихого океана несколько севернее Новой Зеландии. На рис. 1 представлен комплексный график зависимостей  $\delta f_0 F2(t)$  для АИС Дарвин (Австралия), Ахмадабад (Индия), Чилтон и Рим (Европа). Шкала расстояний от эпицентра до соответствующей АИС расположена справа. В левой части рис. 1 дана цена деления по вертикали в процентах для  $\delta f_0 F2(t)$ , отсчитываемой от различных осей абсцисс. Они соответствуют различным АИС и их положение пропорционально расстоянию от АИС до эпицентра. Также справа дано обозначение местоположения ИСЗ при регистрации ЗНС. Предполагается, что ИСЗ пролетал на некотором расстоянии от траектории объекта, обозначенного на рис. 1 эллипсом, воспроизводящим размеры неоднородности. Следует напомнить, что появление ЗНС трактуется, как рефракционный эффект на краю неоднородности. А именно, возможны два типа траекторий, возвращающихся к ИСЗ. Один из них стандартный, обусловленный вертикальным распространением зондирующего сигнала. Другой - связан с рефракцией в краевой области неоднородности. Данные на рис. 1 позволяют оценить параметры движения неоднородности. Величина упреждения  $(\Delta t)_0$  - составляет 12 час.; скорость равна  $V \approx 900$  км/час. Всё это находится в соответствии с данными работ [2,3].

На рис. 2 представлена карта Мира в проекции Меркатора. На ней нанесены малые кружочки, соответствующие положениям АИС на всех шести обитаемых континентах. Каждый из кружочков окружён более широкой окружностью, условно отображающей «радиус действия» АИС, принятый равным  $10^3$  км. Внутри кругов стоят знаки минус для АИС, в данных которых не обнаружены локальные максимумы, группирующиеся возле прямой, представленной на рис. 1.

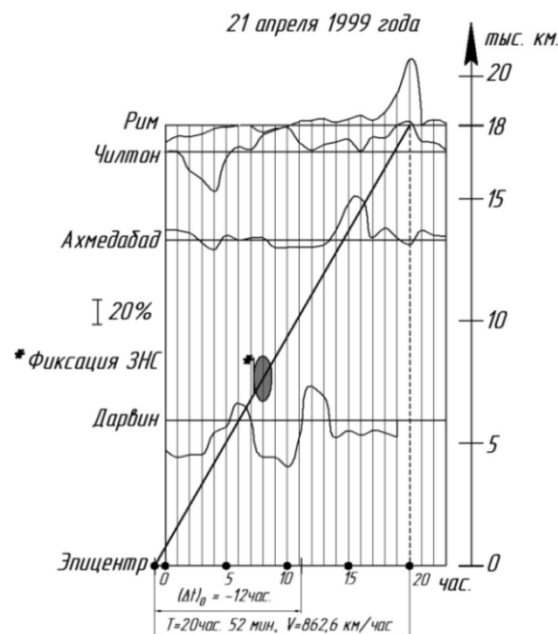


Рис. 1. Комплексный график  $\delta f_o F2(t)$  для различных АИС, оси абсцисс которых сдвинуты по вертикали пропорционально расстоянию АИС от эпицентра; масштаб по вертикали для каждого графика и значок фиксации ЗНС на космической АИС – слева.

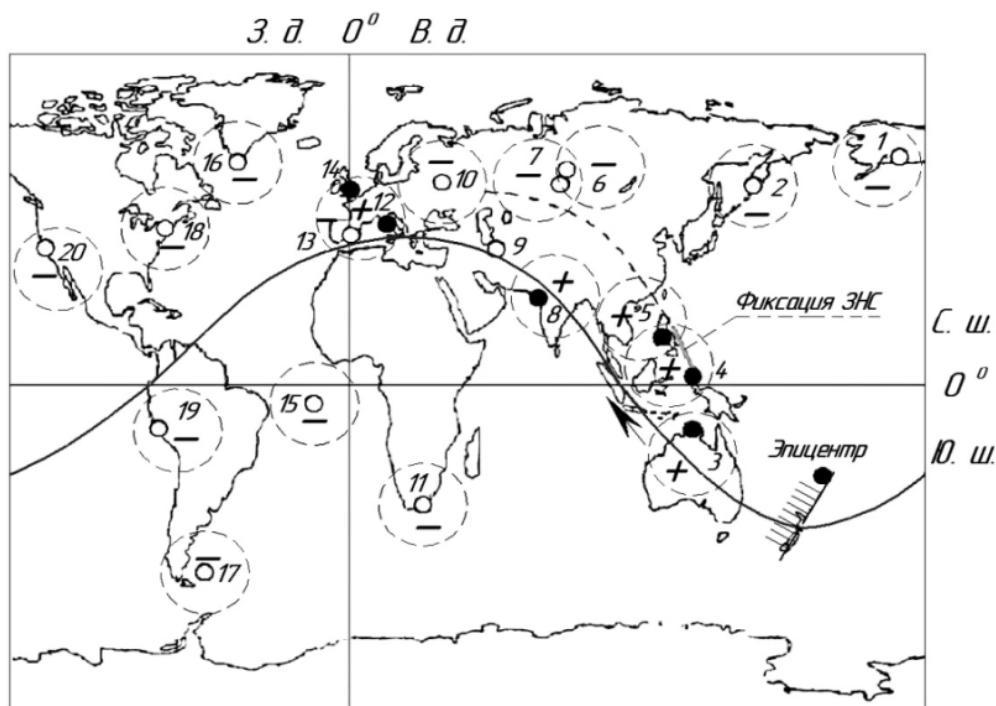


Рис. 2. Движение сейсмогенной неоднородности в области F2 ионосферы и обнаружение ЗНС спутниковой АИС.

Знаками плюс помечены четыре АИС, чьи зависимости  $\delta f_0 F2(t)$  обладают характерными максимумами по времени и координатам сгруппированные вблизи прямой на рис. 1. Эта прямая в виде дуги большого круга представлена на рис. 2. сплошной кривой.

Следует отметить, что положение кривой носит компромиссный характер. Она проходит несколько южнее точки эпицентра, расположенного северо - западнее Новой Зеландии. Следует отметить, что подобное смещение примерно на 2 тыс.км. от места образования ионосферного объекта по отношению к месту выделения вблизи поверхности Земли энергии порядка  $10^{16}$  наблюдалось и в случае наземного ядерного взрыва мегатонного класса [6,7]. Вместе с тем дуга большого круга на рис. 2 проходит перпендикулярно границе тихоокеанской литосферной плиты, помеченной полосатой структурой. Такое наблюдалось практически во всех проанализированных случаях динамики сейсмогенных ионосферных объектов. Далее следует указать на то, что помеченные знаком плюс индонезийская и филиппинская АИС не дали надёжное обнаружение объекта. Ашхабадская АИС дала чёткое необнаружение. Две АИС в Великобритании, Чилтон и Слоу, дали противоположные результаты по обнаружению. Существенно, что испанская АИС не дала заметного эффекта вблизи прямой на рис. 1. И расположенная в Южной Америке АИС помечена знаком минус. Всё это заставляет предположить, что объект прекратил существование на дальности  $D \approx 20$  тыс. км. При магнитуде землетрясения  $M = 6$  это находится в согласии с эмпирической формулой для предельной дальности  $D_i$ , на которой объекты прекращают свое существование [7]

$$\frac{D_i}{D_0} = 1 + 0.7 (M - 5) + 0.3 (M - 5)^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $D_0 \approx 10$  тыс. км.

На рис. 2 пунктиром показана траектория ИСЗ и тонкой линией с изломом показано место, где спутниковая АИС зарегистрировала ЗНС. Совокупность данных, представленных на рис. 1 и рис 2, позволяет сделать вывод об обнаружении сейсмогенной макромасштабной неоднородности в области F2 двумя независимыми методами. В данном случае процесс обнаружения завершился за 4 часа до землетрясения. Гипотетические координаты эпицентра можно было бы указать с погрешностью порядка  $10^3$  км.

#### 4. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 05.05.1999 г.

Землетрясение произошло на Аляске, и характеризовалось магнитудой несколько более семи. Положительные вариация  $\delta f_0 F2(t) > 0$  типа максимум были зарегистрированы рядом АИС, отмеченных на рис. 3 номерами 1 – 4 и 7 – 9. Для упрощения рисунка из зависимостей  $\delta f_0 F2(t)$  выделены только точки максимумов.

На рис. 3 квадратиками 5 и 6 помечены середины интервалов времени, когда на ИСЗ «Интеркосмос - 1837» среди сигналов, зарегистрированных спутниковой АИС имел место ЗНС. Он был обнаружен на двух последовательных витках ИСЗ. Незачернённый кружочек 10 на рис. 3 означает, что кругосветное движение  $D = 40$  тыс.км., не завершилось. Повторное обнаружение спустя 30 часов  $\delta f_0 F2(t + 30ч) > 0$  на АИС с номером 1 не состоялось. Уместно отметить, что при всей приближённости приведенной выше формулы для максимальной дальности существования объекта она для  $M = 7$  даёт значение  $D_i = 36$  тыс. км. Именно на такой дальности от эпицентра находится АИС под номером 9, последняя, зарегистрировавшая сосредоточенную во времени положительную вариацию  $\delta f_0 F2(t) > 0$ .



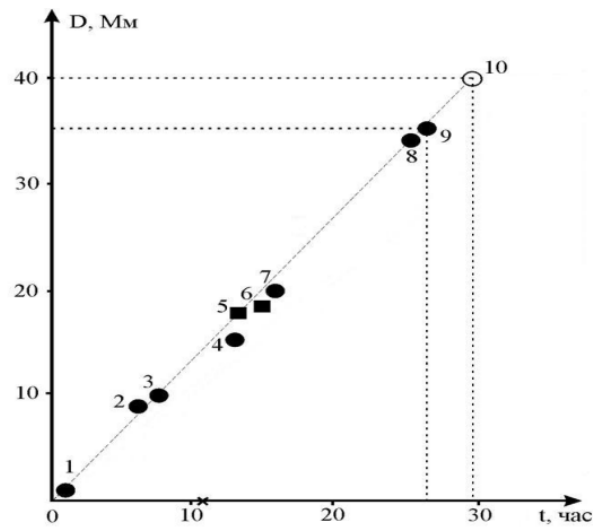


Рис. 3. График зависимости дальности до эпицентра АИС, зарегистрировавших положительную локальную вариацию  $\delta f_0 F2(t) > 0$  от времени в интервале, включающем момент главного удара землетрясения на Аляске 05.05.1999 г.

На рис. 3 крестик на оси абсцисс соответствует моменту землетрясения. Время упреждения составляет 11 часов, скорость движения 1,33 тыс. км/час. Только АИС с номерами 1 – 3 зарегистрировали сигналы до момента главного удара. То есть в краткосрочном прогнозе землетрясения данные ЗНС с номерами 5 и 6 не участвовали. Но это только подтверждает утверждение: для такого прогноза требуется система ИСЗ, оснащённых спутниковыми АИС. На рис. 4 представлено местоположение АИС с теми же номерами, что и на рис. 3, чёрные маленькие кружочки на фрагменте А.

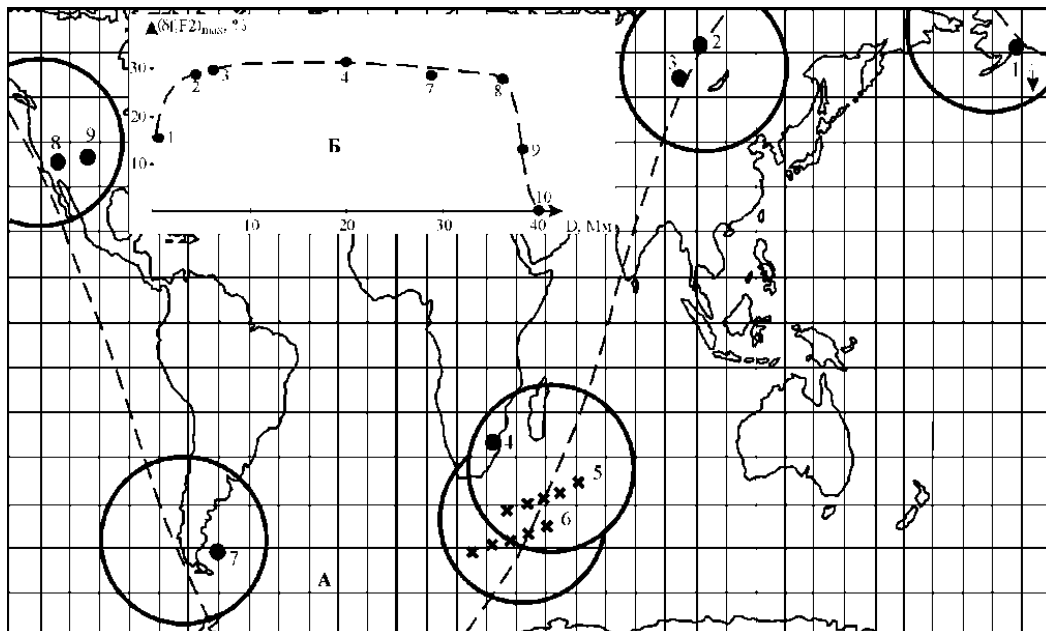


Рис. 4. Элементы кругосветной траектории движения макромасштабной неоднородности, расположение АИС и схема положения неоднородности во время землетрясения 05.05.1999 г.; обнаружение объекта спутниковой АИС.

Б. Зависимость вариаций  $(\delta f_0 F2)_{max}$  от дальности.

Пунктиром проведена компромиссная траектория, соответствующая дуге большого круга, которая вблизи эпицентра ортогональна к границе Тихоокеанской литосферной плиты. На пунктирную кривую в окрестностях АИС «нанизаны» окружности, соответствующие средним размерам сейсмогенной ионосферной неоднородности. Естественно, эта процедура, как и проведение дуги большого круга, лишена единственности. Вероятно, окружности, вмещающие в себя наземную АИС 4 и ЗНС 5 и 6, следовало бы расположить несколько севернее. Но произвол здесь невелик. Из графических изображений на рис. 4 следует, что к моменту землетрясения неоднородность находилась вблизи северного побережья Индийского океана. Но данные АИС Индии за нужный период времени отсутствовали. Вероятно, если бы другой ИСЗ в «нужное» время пролетал, например, над пустыней Гоби и обнаружил бы ЗНС, вместе с данными Росгидрометовских АИС 2 и 3 это послужило бы надёжной основой краткосрочного прогноза землетрясения. На фрагменте Б дана зависимость  $(\delta f_0 F_2)_{max}$  от дальности вдоль траектории объекта. Вдоль её средней части эта величина примерно постоянна и плавно убывает на интервале дальности порядка 1,5 тыс. км., то есть примерно в течение  $\tau = 3 \cdot 10^3$  сек. Можно предположить, что убывание происходит вследствие амбиполярной диффузии, что даёт возможность оценить вертикальные размеры неоднородности  $L$ . Так известно соотношения  $L^2 = 4D\tau$ , где  $D$  – коэффициент продольной амбиполярной диффузии, на высоте главного максимума ионосферы заключённый в пределы  $10^9 - 10^{10}$  см<sup>2</sup>/сек [8]. Для приведенного значения  $\tau$  получается оценка  $L = 30 - 50$  км. Следует отметить, что примерно такие же значения  $L$  получаются из данных о релаксации отрицательной неоднородности, возникающих после приземных ядерных взрывов мегатонного класса [7]. Меньшее из полученных значений  $L$  находится в согласии с параметрами гипотетической неоднородности, использовавшейся при синтезе ЗНС [4].

Далее целесообразно привести карту границы литосферных плит [9], см. рис. 5. На фрагменте карты Мира в проекции Меркатора нанесена область Тихого океана с окрестностями, включающими обе Америки, восточную часть Евразии и Австралию. Указаны названия пяти литосферных плит. Возле их границ стрелками дана ориентация траекторий ионосферных сейсмогенных неоднородностей в окрестностях эпицентров по данным [2,6,10,11,12]. Двойные стрелки относятся к землетрясениям, рассмотренным выше.



Рис. 5. Границы литосферных плит и ориентация траекторий ионосферных сейсмогенных неоднородностей в окрестностях эпицентров.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмогенные объекты в области F2 ионосферы могут быть зарегистрированными с помощью АИС наземного и космического базирования. Рассмотренные случаи относятся к ситуации, когда в течение времени обнаружения имело место только одно землетрясение. Вместе с тем известны ситуации, когда это не так. Так ЗНС наблюдались на участке траектории ИСЗ от Камчатки до Южно-китайского моря длиной около 5 тыс. км. В работе [11] указывалось, что в соответствующий интервал времени наблюдалось семь землетрясений. Была предпринята попытка показать, что три из них создали «парад неоднородностей» на пути движения ИСЗ вдоль всего участка обнаружения ЗНС. В диссертации [13] приведены данные об обнаружении ЗНС на длительном участке траектории вблизи Тихоокеанской части экватора. Не отрицая возможности появления ЗНС за счёт экваториальной аномалии ионосферы, следует указать, что и в этом случае имели место два «подходящих» землетрясения в Северной части Южной Америки. Это даёт возможность утверждать, что основной причиной возникновения ЗНС являются сейсмогенные неоднородности. А, например, экваториальная аномалия или магнитные бури могут рассматриваться как источник ложных тревог. На сегодня затруднительно дать ответ на многие вопросы. Главный из них - геофизическая схема и математическая модель трансформации первичных ударных волн атмосферы (сейсмогенных или антропогенных) в макромасштабные ионосферные неоднородности в области F2. И самим этим объектам приходится приписывать необычные свойства, частично перечисленные выше.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalinin Y. K., Sergeenko N. P. a.o. The large-scale isolated disturbances dynamics in the main peak of electronic concentration of ionosphere. // *Jorn. of Atmosph. and Sol.-Terr. Phys.*, 65(2003) p.1175.
2. Leonard R. S., Barnes R. A. Observation in Ionospheric Disturbances Following the Alaska Earthquake. // *J. Geophys. Res.* V.70. NS. P1250, 1965.
3. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 568 с., 1979.
4. Данилкин Н. П. Прогноз землетрясений из космоса // *Новости космонавтики*. 2002. № 11. С. 56-57.
5. Данилкин Н. П., Котонаева Н. Г., Анишин М. М. Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах – новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. т. XLIX, №1, С.9, 2006.
6. Дзвонковская А. Л., Калинин Ю. К., Кузнецов В. А., Сергеенко Н. П., Васькин А. А. Нелинейные макромасштабные неоднородности в области F2 ионосферы Земли // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. № 2 - 3. С.62 – 68.
7. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1989.
8. Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П. Макромасштабные движущиеся неоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до сильных землетрясений. // *Доклады. РАН*, 2002. Т.387, №1. С.105.
9. Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П., Горенко В. Е. Нелинейные эффекты движения макромасштабных сейсмогенных и антропогенных неоднородностей в области F2 ионосферы. // *Доклады РАН*, 2005. Т.407, №4, С.5253.
10. Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П. и др. Ионосферный контроль в экологии. М.: Госэкоцентр. 2002. 52 с.
11. Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П., Сазанов А. В. Динамика макромасштабных неоднородностей, возникающих в главном максимуме в окрестностях эпицентров сильных землетрясений. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т.44, №2, С.239.
12. Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П., Сазанов А. В. Кругосветные движения сейсмогенных макромасштабных неоднородностей в области F2 ионосферы. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т.44, №4, С.331.
13. Котонаева Н. Г. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. ИПГ, 2010.

## **Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф**

С. А. Пулинец<sup>1</sup>, Д. Узунов<sup>2</sup>

*1- Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*2- Университет Чэпмена, Орандж, Калифорния, США*

*e-mail: pulse@ipg.geospace.ru*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Очень часто появление новых технологий измерения различных процессов приводит не просто к улучшению качества получаемых данных, а к кардинальным изменениям в понимании самих процессов, понимании механизмов, их генерирующих, и общей взаимосвязи явлений на разных уровнях их проявления. Именно это произошло при развитии методов спутникового мониторинга различных проявлений природных и техногенных катастроф. Рассмотрим это на примере тепловых аномалий, наблюдаемых в сейсмоактивных областях перед землетрясениями. Появление инфракрасных радиометров на спутниках и измерения над сейсмоактивными областями [1] поначалу рассматривались как подтверждение известного факта наличия тепловых (или метеорологических) аномалий, обнаруженных с помощью наземных измерений [2]. Однако усовершенствование технологий на наших глазах производит переворот как в понимании процесса подготовки землетрясений, так и в геотектонике. Во-первых, подтверждается упоминающийся в литературе факт, что выделение газов из земной коры играет важную роль в процессе подготовки землетрясения [3,4]. Миграция газов в земной коре, таких как гелий и водород, приводит к изменению ее механических свойств, а вынос на поверхность инертного, но радиоактивного газа радона запускает цепь процессов в атмосфере, ответственных за появление различных типов краткосрочных предвестников. Именно радон стал в последнее время центром дискуссий в среде сейсмологов, а иногда и политических скандалов, как это случилось после землетрясения в Аквиле в Италии в апреле 2009 г. В предложенной нами теории комплексных связей в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера радон также играет очень важную, если не основную роль, поэтому имеет смысл начать описание модели и предлагаемых методов спутникового мониторинга предвестников землетрясений именно с этой проблемы, поскольку именно интенсивное выделение радона из активных тектонических разломов приводит, в конечном счете, к генерации тепловых аномалий, регистрируемых со спутников.

### **2. РАДОН – ИСТОЧНИК КОНФЛИКТОВ**

Землетрясение 6 апреля 2009 г. вблизи старинного итальянского города Аквила стало не только трагической страницей в истории Италии (около 300 погибших, более 29 тыс. без крова), но и источником грандиозного скандала в научной среде, отголоски которого не утихли до сих пор. Инженер-ядерщик Джоаккино Джулиани, работавший в астрофизической ядерной лаборатории Гран Сассо, расположенной в Аквиле, поместил в своем блоге в интернете сообщение о готовящемся землетрясении и призвал жителей покинуть свои дома 5 апреля. В этот же день государственная комиссия, возглавляемая директором Национального института геофизики и вулканологии в Риме профессором Энцо Боски, заявила, что участвовавшие толчки – явление естественное, и ничего жителям

не угрожает. Джулиани был объявлен шарлатаном и получал угрозы от муниципальных властей вплоть до угрозы ареста. На следующее утро случилось трагическое землетрясение. Шок и возмущение жителей города были настолько велики, что национальной комиссии по прогнозу землетрясений пришлось долго оправдываться, но Джулиани это не спасло: кажется, что весь ученый мир Италии ополчился против него. Ему не могут простить, что вся государственная машина сейсмологии, довольно хорошо финансируемая, была в одно мгновение повержена простым инженером, у которого и публикаций-то нет. Вдобавок, он опроверг так лелеемую сейсмологами в течение последних лет 15 парадигму, сформулированную во время дискуссии на сайте журнала Nature, инициатором которой был профессор Токийского университета Геллер [5]. Парадигма очень простая: краткосрочный прогноз землетрясений невозможен в принципе, а поэтому сейсмология умывает руки.

Что же такое изобрел Джулиани? Он разработал новый тип датчика, который регистрирует не высокоэнергичные альфа-частицы (5.49 МэВ), излучаемые радоном при распаде, а низкоэнергичные бета-линии дочерних продуктов распада – изотопов свинца и висмута с энергиями 351 кэВ и 609 кэВ соответственно (см. Рис. 1). Специальная конструкция датчика и его расположение в изолированной камере под землей позволили исключить шумы метеорологического происхождения (вариации радона, связанные с осадками, изменениями температуры и давления) и получать четкие предвестники даже для очень слабых землетрясений, начиная с магнитуды 2.5. Парадокс ситуации заключается в том, что несмотря на притеснения и травлю, авторитет прогнозов Джулиани настолько велик, что во время саммита глав 8 ведущих государств в Аквиле в июле того же 2009 г., когда сейсмическая активность еще давала о себе знать, к нему тайно обращались за прогнозами сейсмических толчков во время саммита с целью обеспечения безопасности глав государств восьмерки.

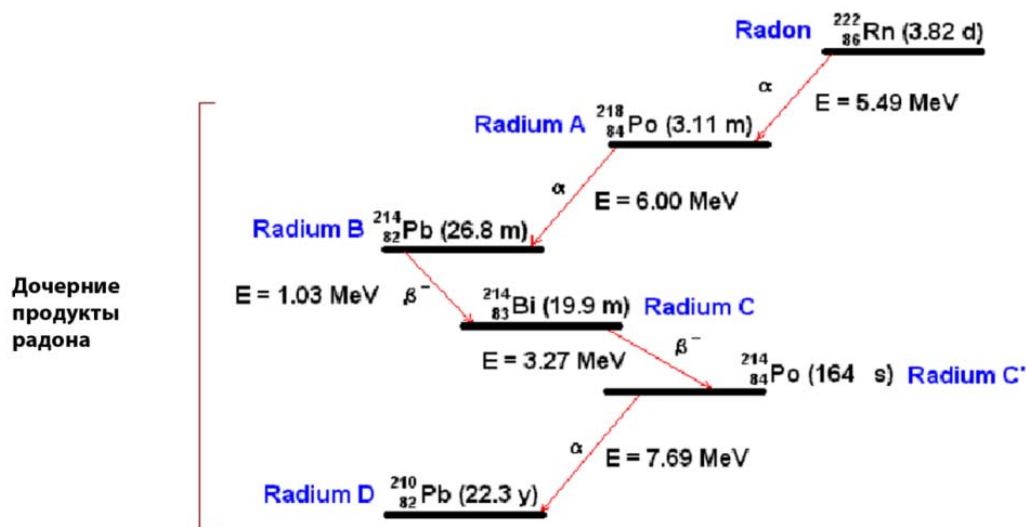


Рис. 1. Схема распада радона  $^{222}\text{Rn}$

Все это было бы смешно, кабы не было так грустно. 12 марта 2010 года тот же Национальный институт геофизики и вулканологии, который преследовал Джулиани, заявил, что учеными института сделано «открытие» о том, что уменьшение или увеличение выделения радона из земной коры может быть предвестником землетрясения!

### 3. РАДОН, АТМОСФЕРА И КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА

Первые идеи о возможности связи вариаций радона перед землетрясениями и аномальных вариаций в ионосфере земли были высказаны нами еще в 1997 г. [6]. Однако потребовалось более 10 лет исследований, чтобы в конечном итоге прийти к правильному пониманию проблемы. Необходимо было связать в единую цепь природную радиоактивность в виде эманаций радона, атмосферное электричество, позволявшее объяснить появление аномалий в ионосфере, и тепловые аномалии, которые, как оказались, появляются практически одновременно (с некоторым опережением) с ионосферными. Настоящий прорыв удалось осуществить в результате комплексного исследования атмосферных и ионосферных аномалий для землетрясения в Колиме (Мексика) М7.6, 21 января 2003 г. [7]. Именно в результате этого исследования пришло осознание того, насколько мощными являются тепловые эффекты перед землетрясением, приводящие к изменениям температуры и влажности на больших территориях, что было невозможно объяснить никакими тепловыми потоками тектонического происхождения, термальными водами или инфракрасным излучением в результате механической деформации твердых пород. Стало ясно, что тепло выделяется непосредственно в атмосфере в виде скрытой теплоты испарения, а центрами конденсации для влаги становятся ионы, образуемые в результате ионизации атмосферных газов радоном, выделяемым из земной коры перед землетрясением. Плазмохимические процессы в приземном слое воздуха и проблемы вариаций влажности воздуха были рассмотрены в работе [8], а оценки тепловой энергии, выделяемой в результате ионизации связанной с выделениями радона, приведены в работе [9].

Альфа-частицы с энергией порядка 5.49 МэВ, испускаемые радоном, ионизируют молекулы воздуха. Вновь образованные ионы вступают в плазмохимические реакции, образуя новые соединения. Эти соединения или конечные ионы становятся центрами конденсации водяного пара, всегда присутствующего в атмосфере. Конденсация (или точнее, присоединение молекул воды к ионам) делает эти ионы устойчивыми, поскольку высокий дипольный момент молекул воды предохраняет ионы от рекомбинации. Лабораторные эксперименты [10] и измерения аэрозолей, образуемых перед землетрясениями [9] показывают, что ионы являются центрами конденсации водяного пара.

В результате конденсации уменьшается количество свободных молекул водяного пара в воздухе, что при достаточной интенсивности процесса можно зарегистрировать как уменьшение влажности. Молекулы воды, присоединяясь к ионам, изменяют свое фазовое состояние со свободного на связанное, что сопровождается выделением в окружающее пространство скрытой теплоты испарения, являющейся физической константой ( $Q=40.683$  кДж/моль).

Выделение энергии в атмосферу приводит к повышению температуры воздуха. Несмотря на то, что увеличение концентрации радона в воздухе весьма незначительно, энергетическая эффективность процесса ионизации настолько высока ( $> 10^8$ ), что эти изменения приводят к вариациям параметров атмосферы, регистрируемым с помощью как наземной метеорологической аппаратуры, так и методами дистанционного зондирования с борта искусственных спутников Земли. Вторым немаловажным фактором является размер области подготовки землетрясения. Для сильных землетрясений  $M \approx 7$  площадь области подготовки составляет порядка сотен тысяч квадратных километров, что не может остаться незамеченным.

Именно повышение температуры приповерхностного слоя воздуха над активными тектоническими разломами – один из признаков готовящегося землетрясения, регистрируемый с помощью инфракрасных спектрометров, устанавливаемых на спутниках дистанционного зондирования. На Рис. 2 показан пример регистрации

тепловых аномалий перед разрушительным землетрясением М7.9 26 января 2001 г. в Индии в области Гуджарат в сравнении со схемой разломов [11]. Как видно из рисунков, тепловые аномалии точно повторяют конфигурацию разломов.

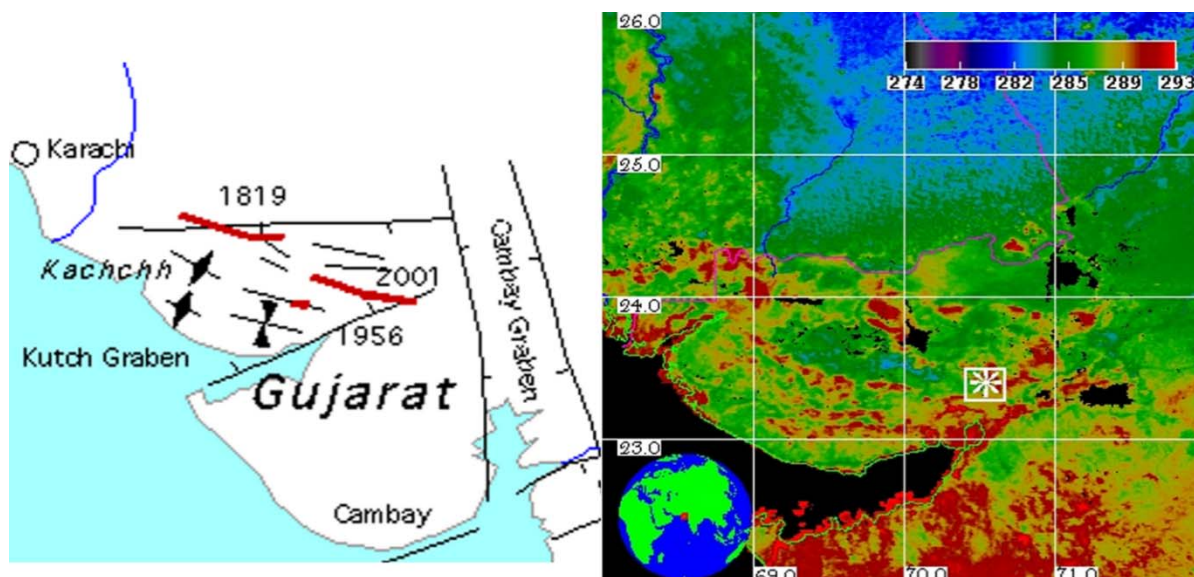


Рис. 2. Левая панель – схема разломов в области Гуджарат, Индия. Правая панель – тепловые аномалии, зарегистрированные с помощью прибора MODIS, спутник AQUA.

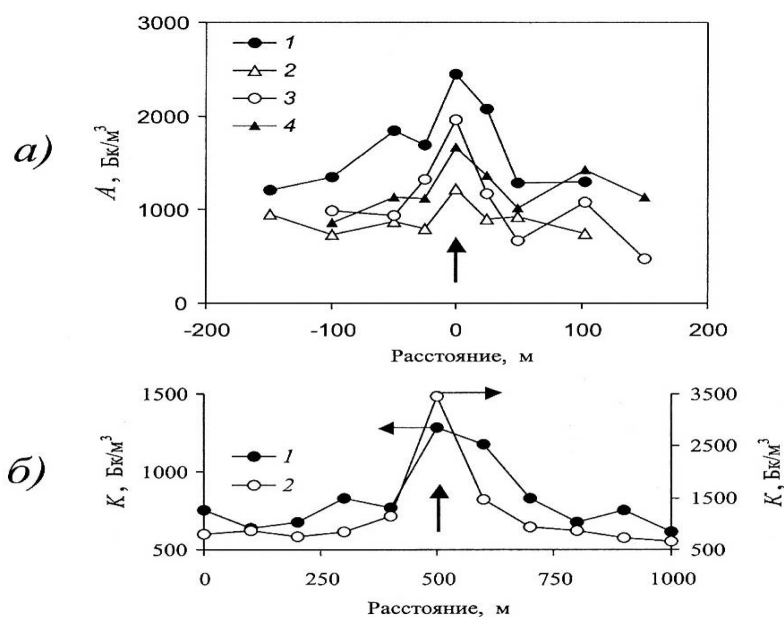


Рис. 3. Объёмная активность радона в подпочвенной атмосфере вдоль трасс, пересекающих тектоническое нарушение II ого порядка;  
а)- пункты 3-6(1-4);  
б)- пункты 5(1) и 2(2)  
(вертикальными стрелками обозначено положение тектонического разлома)

Возникает вопрос, почему тепловые аномалии концентрируются в области разломов, если подготовка землетрясения охватывает всю область размером  $R = 10^{0.43M}$ , где  $R$  – радиус области подготовки землетрясения, а  $M$  – его магнитуда [12]? Ответ дает



наземный мониторинг радона в зонах тектонических нарушений [13]. На Рис. 3 представлены вариации радона при его мониторинге поперек линии тектонического разлома. Как видно, концентрация радона максимальна точно над разломом. Эта закономерность выполняется не только для сейсмоактивных областей, но и для любых разломов в земной коре. Становится понятной линейная структура тепловых аномалий в областях подготовки землетрясений, видимая со спутников, и линейная структура облаков над этими областями [14]. Получают свое объяснение и частые неудачи наземного мониторинга радона. Большинство станций измерений радона стационарны, а мониторинг со спутников выявил высокую временную изменчивость тепловых аномалий: их конфигурация меняется день ото дня [15], и это невозможно отследить с помощью неподвижных датчиков. Таким образом, спутниковый мониторинг не только позволил объяснить парадокс радона при исследовании краткосрочных предвестников землетрясений, но и сыграл решающую роль в разработке комплексной модели процессов в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера.

Схематически эту модель удобно представить в виде диаграммы (Рис. 4), на которой можно проследить развитие процессов от поверхности земли до ионосферы и магнитосферы. Мы можем также условно разделить наблюдаемые эффекты на три категории: тепловые (левая ветвь модели), атмосферные или облачные (средняя ветвь модели) и электромагнитные или ионосферные (правая ветвь модели).

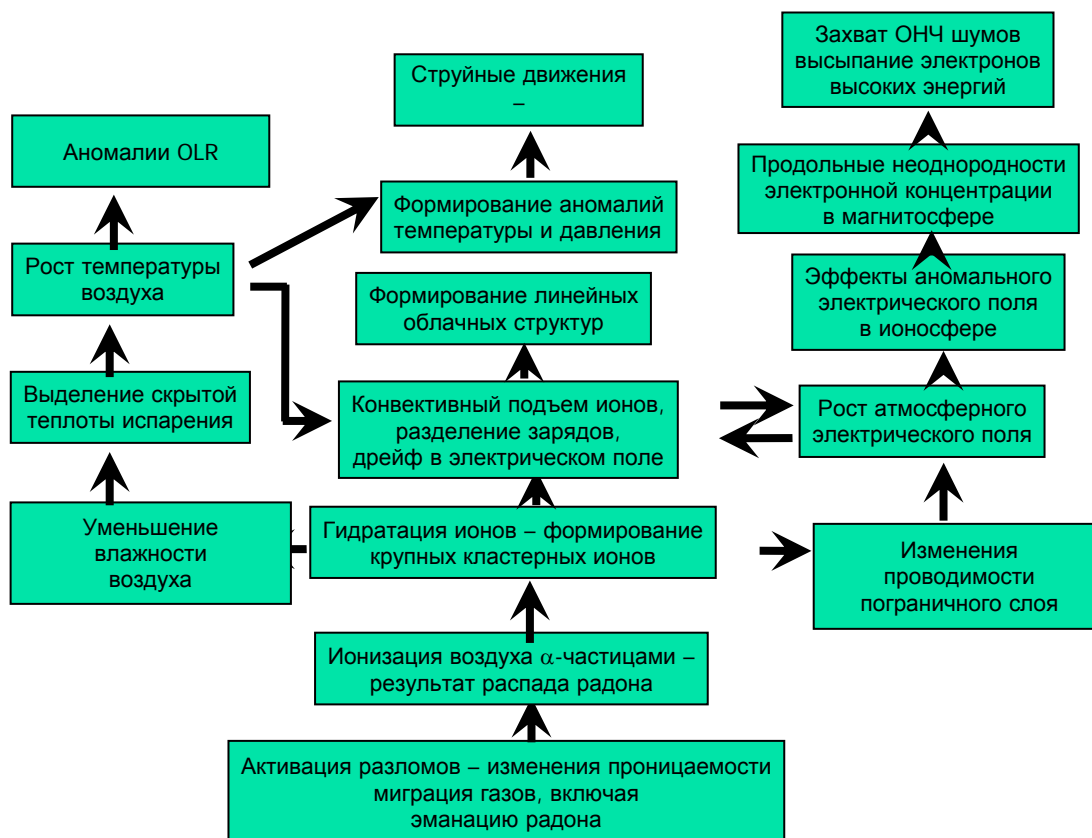


Рис. 4. Схематическое представление комплексной модели связей в системе Литосфера – Атмосфера – Ионосфера

В тепловой ветви основным процессом является выделение скрытой теплоты испарения при конденсации паров воды на ионах, образованных после ионизации молекул атмосферных газов радоном. Если вблизи поверхности земли тепловые аномалии проявляются в виде линейных структур, вытянутых вдоль активных разломов, то затем



вследствие наличия горизонтальных градиентов температуры и давления начинается процесс перемешивания и образуется вертикальный восходящий поток, т.к. в общем температура воздуха над областью подготовки землетрясения выше, чем вне нее. В результате мелкомасштабная турбулентность вследствие развития обратного каскадного процесса (развитие турбулентности с увеличением пространственного масштаба) приводит к образованию крупномасштабной структуры – теплового пятна на уровне верхней кромки облаков 10 - 12 км (OLR – убегающее длинноволновое инфракрасное излучение).

Атмосферные и электромагнитные процессы “работают” совместно: Вертикальная конвекция, возникающая вследствие выделения скрытой теплоты испарения, выносит кластерные ионы наверх, что приводит к вытеснению легких ионов и изменению проводимости атмосферы в пограничном слое (толщина пограничного слоя меняется в течение суток от нескольких сот метров в предрассветные часы до нескольких километров в послеполуденное время). В свою очередь, вертикальное электрическое поле над разломами поддерживает линейную структуру потоков кластерных ионов – ядер конденсации, что приводит к образованию линейных облачных структур – одного из краткосрочных предвестников землетрясений.

Помимо образования линейных облачных структур к числу атмосферных аномалий, наблюдаемых перед землетрясениями, следует отнести струйные течения. Это горизонтальные потоки воздуха на высоте от 6 до 30 км, имеющие длину несколько тысяч километров, а в поперечнике – 50 - 100 км. Скорость ветра вблизи оси струйного течения достигает 200 - 300 км/ч. Субтропические струйные течения обычно наблюдаются на уровне 300 мбар, т.е. на той же высоте, что и OLR (9 - 12 км). Пятно OLR по сути представляет собой область пониженного давления, поэтому сейсмогенные струйные течения своим концом указывают на положение эпицентра будущего землетрясения. Отличительным признаком таких течений является еще и тот факт, что их положение остается неизменным в течение нескольких часов [16]. На Рис. 5 показан пример струйного течения, наблюдавшегося перед сильным землетрясением в Пакистане.



Рис. 5. Пример струйного течения, зарегистрированного перед землетрясением ( $M = 6.4$ ) в Пакистане (30.65 N, 67.32 E) 28 октября 2008 г.

Обычно заблаговременность появления струйных течений составляет несколько недель.

Основным фактором, приводящим к генерации аномалий в ионосфере и магнитосфере, являются аномалии в атмосферном электричестве, связанные с изменением проводимости пограничного слоя атмосферы. Они способствуют генерации аномальных электрических полей в ионосфере, приводящих к дрейфу ионов и образованию крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации и вариациям температуры ионов и электронов. Модификация всей магнитосферной трубки, опирающейся на область подготовки землетрясения, приводит к образованию ионосферных неоднородностей не только над областью подготовки землетрясения, но и в магнитосопреженной точке. Рассеяние ОНЧ шумов в модифицированную магнитосферную трубку приводит к повышению уровня шумов ОНЧ диапазона внутри данной трубки, а также более эффективному взаимодействию ОНЧ излучений с энергичными электронами радиационных поясов и их стимулированному высыпанию перед землетрясениями.

Если попытаться сформулировать главный вывод из данного раздела, то можно утверждать следующее: после периода резкого увеличения уровня эманации радона из активного тектонического разлома должны регистрироваться аномалии атмосферных и ионосферных параметров, причем, в некой временной последовательности с определенным запаздыванием по мере увеличения высоты проявления регистрируемой аномалии. Впервые такую последовательность удалось зарегистрировать для землетрясения в Аквиле в апреле 2009 г. Этот результат показан на Рис. 6, где можно видеть, как последовательно появляются увеличение уровня радона, повышение поверхностной температуры воздуха, появление аномалии OLR, и наконец, появление ионосферной аномалии. Пространственное совпадение аномалий OLR и в ионосфере показано на Рис. 7.

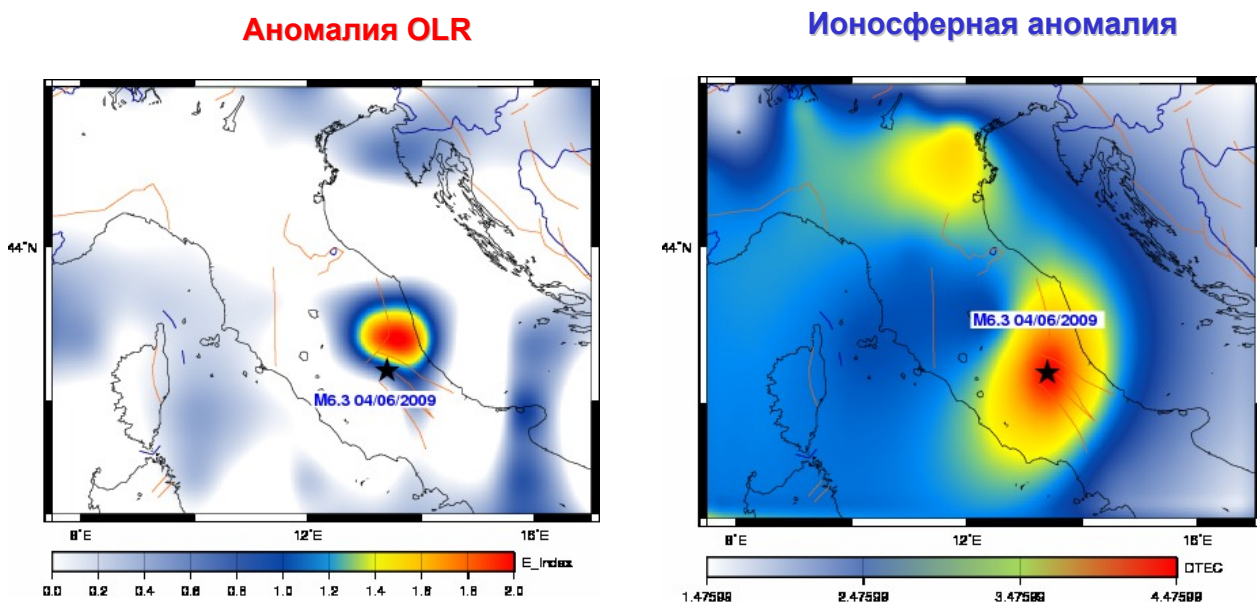


Рис. 7. Аномалии OLR (слева) и GPS TEC (справа) перед землетрясением в Аквиле 6 апреля 2009 г.

#### 4. МОЖНО ЛИ НАЗЫВАТЬ НАБЛЮДАЕМЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКАМИ?

Основная критика, поступающая со стороны официальной сейсмологии, касается того, что большинство публикаций по различным так называемым предвестникам является описанием отдельных случаев без проведения тщательного статистического анализа. На самом деле это абсолютно не соответствует действительности. Уже в 1999 г. был проведен полный анализ (без единого пропуска) данных вертикального зондирования ионосферы на Тайване за несколько лет [17], где было убедительно показано, что вероятность наблюдения аномалий в течение 5 суток перед сейсмическим толчком весьма велика (см. Табл. 1), а для магнитуды, превышающей 6, приближается к 100%. Для ионосферных предвестников была выдвинута концепция «маски» предвестника [18].

Таблица 1.

Вероятность обнаружения ионосферных аномалий с течение 5 суток перед сильным землетрясением как зависимость от магнитуды

	$M \geq 5$		$M \geq 5.5$		$M \geq 6$	
	P(i)	$\Sigma^j P(i)$	P(i)	$\Sigma^j P(i)$	P(i)	$\Sigma^j P(i)$
1 день до ЗТ	28%	28%	44%	44%	56%	56%
2 дня до ЗТ	14%	42%	21%	65%	11%	67%
3 дня до ЗТ	22%	64%	15%	80%	11%	78%
4 дня до ЗТ	9%	73%	9%	89%	11%	89%
5 дней до ЗТ	0.8%	73.8%	6%	95%	11%	100%

Эта концепция позволяет говорить о схожести аномальных ионосферных вариаций для каждого геофизического региона и возможности строить прогноз на базе подхода распознавания образов. Период 5 суток был получен и для статистического анализа ионосферных аномалий, регистрируемых с помощью навигационной спутниковой системы GPS [19]. Различные подходы описаны в книге [20].

В ходе развития методов мониторинга тепловых аномалий были проведены статистические исследования тепловых предвестников (OLR) для нескольких десятков крупных землетрясений, имевших место в течение 2003 - 2008 гг. Оказалось, что и для тепловых предвестников характерен интервал 5 суток, когда наиболее высока вероятность обнаружение тепловой аномалии.

Статистический анализ распространения ОНЧ сигналов над областями подготовки сильных землетрясений показал аналогичную зависимость вероятности обнаружение предвестника [21]. Таким образом, 4 различных метода регистрации краткосрочных предвестников (вертикальное зондирование, измерений полного электронного содержания с помощью системы GPS, тепловые аномалии убегающего потока инфракрасного излучения OLR, аномалии распространения ОНЧ сигналов над область подготовки землетрясения) показывают один и тот же результат, что подтверждает общность процессов, ответственных за появление регистрируемых предвестников, и справедливость представленной физической модели (см. Рис. 8).

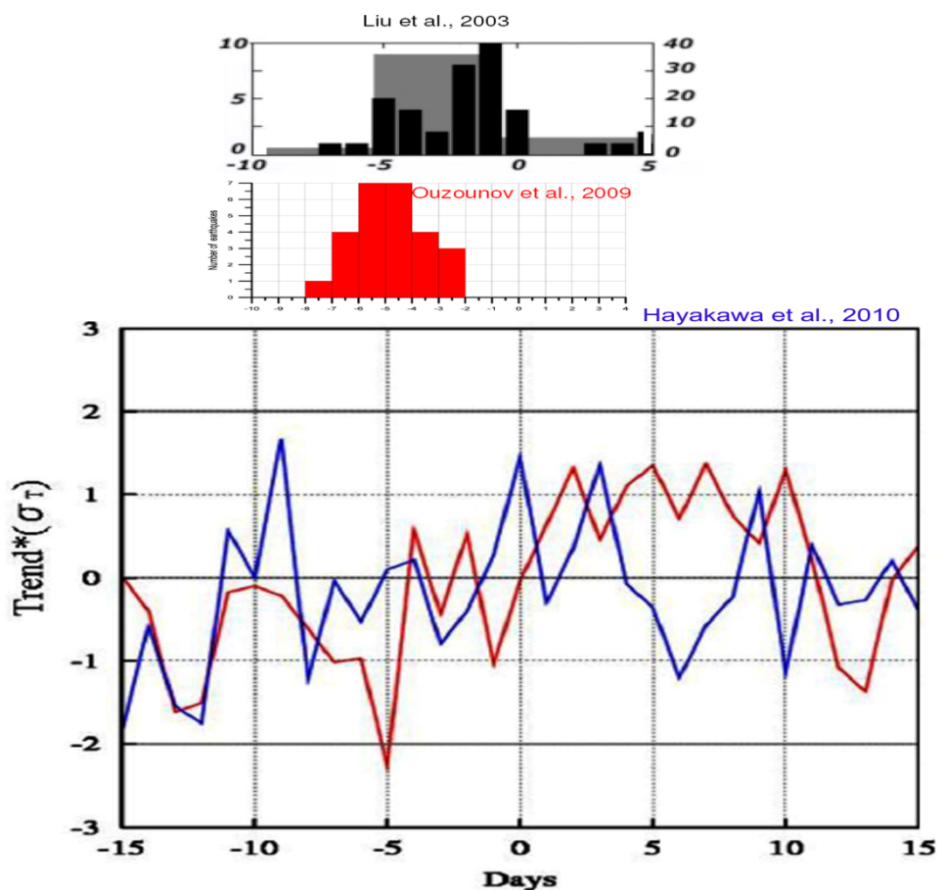


Рис. 8. Сверху вниз:  
 вероятность обнаружения ионосферных предвестников с помощью  
 навигационной системы GPS,  
 вероятность обнаружения тепловых аномалий убегающего потока  
 инфракрасного излучения OLR,  
 вероятность обнаружения аномалий распространения ОНЧ сигналов (красная линия)

## 5. ЧТО И КАК МОЖНО ИЗМЕРЯТЬ НА СПУТНИКЕ

Вопрос организации спутникового мониторинга предвестников землетрясений рассматривался в недавней публикации [22], однако развитие технологии и теории сейсмо-ионосферных связей идет настолько стремительно, что позиция, изложенная в цитируемой работе, требует уточнения. Прежде всего, это касается иерархии предвестников и предложения совместить на одном спутнике измерения атмосферных и плазменных параметров. Согласно последней версии модели [9] для надежного прогноза, а точнее, раннего предупреждения, необходимо проследить развитие процесса от поверхности земли до ионосферы и магнитосферы, включая такие параметры как: поверхностная температура, вертикальный профиль температуры и влажности, конфигурация облачного покрова, потоки скрытой теплоты испарения, ветры на высоте 9-12 км, потоки убегающего инфракрасного излучения на высоте верхней кромки облаков, концентрация электронов в ионосфере, включая вертикальные профили электронной концентрации, локальные параметры ионосферной плазмы (концентрация, температура электронов и ионов), ионный состав, КНЧ и ОНЧ излучения, квазипостоянные ЭМ поля, потоки частиц и их энергетические спектры. В принципе, идеальным был бы вариант спутника «Метеор» с добавлением аппаратуры спутника «Ионосфера» проекта «Ионозонд». Даже при раздельном существовании этих систем, по-видимому, удастся

решить основные задачи спутникового мониторинга предвестников и проверить основные положения модели уже в 2012 - 2015 годах, когда на аппарате «Метеор-М» №2 прибор МСУ-МР будет работать в полном объеме, включая инфракрасные каналы.

Определяющим фактором в предлагаемом комплексе измерений будет одновременность измерения целого ряда параметров, связанных общим физическим механизмом, их когерентность во времени и пространстве. Однако еще одним немаловажным обстоятельством, определяющим успех миссии, являются параметры орбиты спутника и конфигурация спутниковой системы, если она состоит из нескольких аппаратов. С этой точки зрения следует проанализировать результаты французского специализированного спутника «ДЕМЕТЕР», запущенного в 2004 г. [23]. Его основной задачей была регистрация электромагнитных предвестников землетрясений. За годы существования спутника на орбите (спутник активно работает и в настоящее время) накоплен богатый статистический материал, который позволяет сделать вполне определенные выводы. Основной вывод – это безусловный успех миссии: практически по всем видам измерений на спутнике были получены положительные результаты в смысле наличия предвестников сильных землетрясений. В то же время удивляет очень малая абсолютная величина наблюдаемых аномалий по сравнению с другими имеющимися данными измерений предвестников землетрясений (как наземными, так и спутниковыми). По некоторым видам измерений на спутнике ДЕМЕТЕР (например, в ОНЧ диапазоне) положительный результат был получен только после статистической обработки большого массива данных за длительный период измерений. Это связано с тем, что морфология предвестников (амплитуда, фаза, знак отклонения от нормы) существенно зависит от местного времени [24]. Рассмотрим эту особенность на примере регистрации ионосферных предвестников землетрясений на Тайване [17], см. Рис. 9.

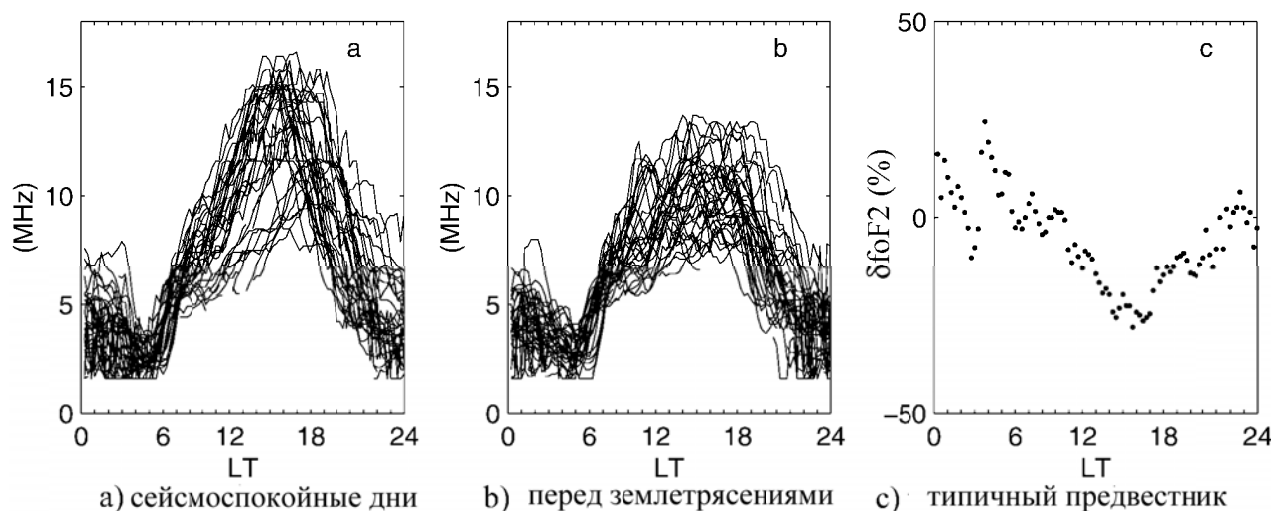


Рис. 9.

- а) – суточные вариации критической частоты ионосферы  $foF2$  в сейсмоспокойные периоды на Тайване;
- б) – суточные вариации критической частоты ионосферы  $foF2$  в интервале времени 5 суток до землетрясений на Тайване;
- в) – разность между б) и а) – ионосферный предвестник как зависимость от местного времени

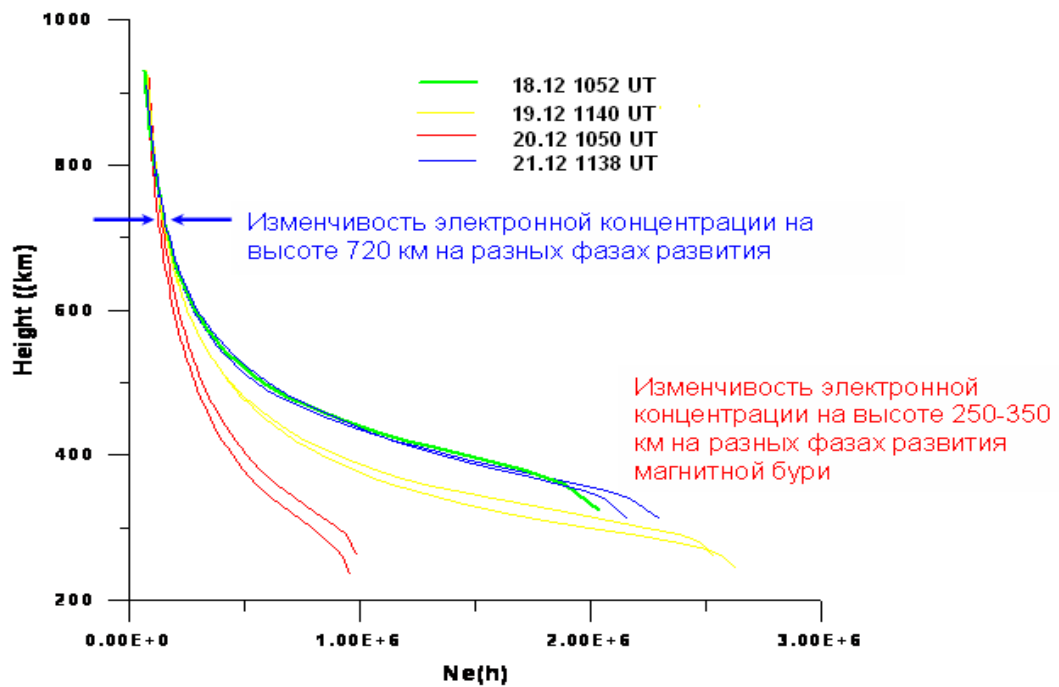


Рис. 10. Изменчивость электронной концентрации по высоте по данным спутникового зондирования со спутника Интеркосмос-19

Как видно из рисунка, максимальные отклонения вариаций критической частоты приходится на послеполуденный интервал, когда вариации значительны. В то же время спутник ДЕТЕТЕР находится на солнечно-синхронной орбите вблизи меридиана 10 – 22 LT. Из Рис. 9 можно понять, что в эти интервалы местного времени амплитуда вариации предвестника близка к нулю, что не позволяет спутнику зарегистрировать сильные вариации в ионосфере перед землетрясениями на Тайване. Учитывая тот факт, что сейсмо-ионосферные вариации на Тайване типичны для большинства низкоширотных землетрясений, очевидно и объяснение слабых вариаций, регистрируемых на спутнике ДЕТЕТЕР. Следует подчеркнуть, что это не вина разработчиков спутника: они были поставлены в такие условия предложенным вариантом попутного запуска.

Второе очень важное обстоятельство – зависимость изменчивости параметров ионосферы от высоты. На Рис. 10 показаны несколько профилей вертикального распределения электронной концентрации во внешней ионосфере, полученных с помощью спутникового ионозонда, установленного на спутнике Интеркосмос-19.

Из рисунка хорошо видно, насколько изменчивость параметров ионосферы больше на высотах 250 - 350 км вблизи максимума электронной концентрации, чем на высоте орбиты спутника ДЕТЕТЕР ~ 740 км. Вполне естественно, что сейсмо-ионосферные вариации, получаемые с помощью спутникового ионозонда, который измеряет весь вертикальный профиль электронной концентрации от высоты орбиты спутника до максимума электронной плотности, в несколько раз больше вариаций, регистрируемых локальными датчиками типа зонда Лэнгмюра.

Что касается количества спутников и конфигурации орбит системы, то все эти вопросы были рассмотрены в работе [22], и можно только подтвердить выводы, сделанные в цитируемой работе. Для успешной работы системы достаточно 4 спутников, расположенных на орбитах с высоким наклонением ~ 83° (или на солнечно-синхронных орбитах в секторах местного времени, чувствительных к ионосферным предвестникам). Высота орбиты должна быть в пределах от 600 до 800 км.

## 6. ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ КАК ОБЪЕКТ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Отметим еще одно очень важное обстоятельство. Процессы ионизации и последующая цепочка процессов, связанных с конденсацией, выделением тепла и атмосферным электричеством, характерны не только для землетрясений. Тепловые и ионосферные аномалии были зарегистрированы после аварий на атомных электростанциях Три-Майл Айлэнд, США (Three-Mile Island) 28 марта 1979 г. и Чернобыльской атомной электростанции 26 апреля 1986 г., над тропическими ураганами (Катрина), и над областями активных натурных экспериментов с ионизацией в Мексике [25]. Мало того, по-видимому, ионизация верхних слоев атмосферы галактическими космическими лучами является одним из факторов, стимулирующих образование и развитие тропических ураганов [26].

Таким образом, описанный выше механизм и предложенные методы спутникового мониторинга имеют универсальный характер, и могут использоваться не только для краткосрочного прогноза землетрясений, но и для мониторинга природных и техногенных катастроф различного происхождения.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа не ставила своей задачей подготовку подробного обзора спутниковых методов мониторинга краткосрочных предвестников разрушительных землетрясений и других видов природных и техногенных катастроф, а скорее, стремилась отразить современные тенденции, наметившихся в этой области в последние годы. Приведенные примеры и аргументация, скорее, могут служить источником оптимизма для создателей спутниковых систем, а также серьезным аргументом, доказывающим актуальность таких систем, и невозможность построения любых систем мониторинга природных и техногенных катастроф без использования спутниковых технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горный В. И., Сальман А. Г., Тронин А. А., Шилин Б. В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
2. Милькис М. Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. С. 36–47.
3. Khilyuk L. F., Chillingar G. V., Robertson J. O. Jr., Endres B. 2000, Gas migration. Events preceding earthquakes, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 390 p.
4. Гуфельд И. Л. Нас ещё ждут сюрпризы природы. Калининградская правда, №15 (17586), 11 февраля 2010 г., г. Королев, Московская обл.
5. Geller R. J. Earthquake prediction: a critical review, Geophys. J. Int. 131, 1997, 425-450.
6. Pulinets S. A., Alekseev V. A., Legen'ka A. D., Khagai V. V. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification, Adv. Space Res., 20, N11, 1997, pp. 2173-2176
7. Pulinets S. A., Ouzounov D., Ciralo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Kotsarenko A., Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003, Annales Geophysicae, 24, 835-849, 2006
8. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnikh L. A., The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes, Physics and Chemistry of the Earth, 31, 143-153, 2006
9. Pulinets S., Ouzounov D., Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model - an unified concept for earthquake precursors validation, Asian Journal of Earth Sciences, 39, 2010, doi:10.1016/j.jseaes.2010.03.005



10. Svensmark H., Pedersen J. O. P., Marsh N. D., Enghoff M. B., Uggerhøj U. I., Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, *Proc. R. Soc. A*, 463, 385–396, 2007
11. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Advances in space research*. 2004 33, pp. 268-273.
12. Добровольский И. П., Теория подготовки тектонического землетрясения // АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. 224 с. 1991.
13. Спивак А. А., Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений, в кн. Геофизика межгеосферных взаимодействий, Москва, ГЕОС, 2008, с. 235-246
14. Doda L., Pulinets S., 2006. Earthquake clouds and physical mechanism of their formation, *EOS Trans, AGU*, 87(52) T31A-0426
15. Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N. and Tramutoli V. 2007, A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj–Gujarat earthquake, *Tectonophysics* 431, 221-230
16. Wu H.-C., Relationship between Jet Streams and M>6.0 Earthquakes at Latitude >30°N between 2006/05/22-2008/10/28, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010 (in press)
17. Chen Y. I., Chu J. Y., Liu Y. J., Pulinets S. A., Statistical study of ionospheric precursors of strong earthquakes at Taiwan area, *Proceedings of XXVIth General Assembly URSI*. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada. August 13-21, 1999. GH1.7. 1999. p. 745
18. Пулинец С. А., Боярчук К. А., Ломоносов А. М., Хегай В. В., Лью Й. Е., Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ критических частот  $f_oF2$  на наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (остров Тайвань), *Геомагнетизм и аэронавигация*, 42, № 4, с.508-513. 2002.
19. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., Tsai Y. B., Chen Y. I., Pulinets S. A., Yu S. B., Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Annales Geophysicae*, 22 (5), pp. 1585-1593, 2004
20. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 315 p., 2004
21. Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A. A., Solovieva M., and Molchanov O. A., A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, *Journal Geophysical Research*, 2010, in press
22. Pulinets S. A., Space technologies for short-term earthquake warning, *Advances in Space Research*, 37, 643-652, 2006
23. Parrot M., The micro-satellite DEMETER, *Journal of Geodynamics*, 33, 535-541, 2002
24. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Зеленова Т. И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени, *Геомагнетизм и аэронавигация*, 38, №3, 188-193, 1998
25. Pulinets S., Ouzounov D., An overview of the development and progress in the lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) model, 2009 AGU Fall Meeting, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract NH11B-02.
26. Бондур В. Г., Пулинец С. А., Ким Г. А., О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина, *Доклады академии наук*, 422, №2, 244-249б 2008
27. Ouzounov D., Pulinets S. Methodology and techniques for monitoring the short term ionospheric and near infrared precursory activities prior to main earthquake, *International Workshop “Early Warning Systems for Earthquake Monitoring by Using Space Technology”*, Feb. 1-2, 2005, Istanbul, Turkey



## Минимизация потерь при использовании прогноза Максимально применимых частот

Е. Н. Хотенко

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*e-mail: madam.ermolova@gmail.ru*

Рассматривается функция потерь радиотехнических систем, использующих ионосферу как канал передачи информации. При этом существует пороговое неравенство в терминах рабочей частоты, являющееся условием существования канала. Анализируются потери в качестве платы за ее прогноз. Они возникают в связи с полностью неустранимой статистической изменчивостью ионосферы. Другой вид потерь связан с отстройкой от оптимальной рабочей частоты. Показывается, что существует решение задачи линейного программирования: наличие точки минимум-минимум функции потерь. Тем самым определяется оптимальная погрешность радиопрогноза максимально применимых частот. И, соответственно, стоимость, а также оптимальная отстройка по частоте. Это является частным случаем общего класса прогнозов, оптимальных по стоимости.

**Ключевые слова:** Максимально применимая частота, прогноз, ионосфера, функция потерь.

Региональные системы передачи информации по ионосферным радиоканалам (радиовещание, связь, загоризонтная радиолокация, служба точного времени и т.д.) характеризуются зависимостью эффективности их работы от прогноза параметров соответствующей области природной среды - радиотрасс. Основную характеристику эффективности работы ионосферной радиосистемы  $P$  можно определить как часть времени, в течение которого данная система работает, а функция потерь  $L$  – как часть времени, в течение которого ионосферная система не работает из-за неиспользования (частичного или полного) того или иного прогноза состояния среды (в качестве исходной информации). Потери, связанные с профилактическими работами, с наличием потока неисправностей и другими техническими факторами, здесь не рассматриваются. Если ввести величины  $P_{max}$  и  $P_{min}$ , соответствующие использованию или отказу прогноза с качеством  $\beta < 1$ , то для величины  $L$  можно получить соотношение

$$L = \Delta P(1 - \beta), \quad (1)$$

где  $\Delta P = P_{max} - P_{min}$  при  $P + L = P_{max}$

Соотношение (1) имеет простую экономическую трактовку. Так если полная стоимость радиосистемы равна  $S_t$  при планируемом сроке ее эксплуатации  $T$ , то величину  $S_p = S_t/T$  можно рассматривать как планируемую капиталоотдачу системы, независимо

от того приносит ли она реальный доход, или ее создание определено неэкономическими потребностями общества (военными, политическими и т.д.). Очевидно, что можно наряду с  $S_p$  рассматривать  $S_r$  – реальную капиталоотдачу в единицу времени, определив ее как  $S_r = P \cdot S_p$  и потери, связанные с использованием радиопрогноза  $S_l = L \cdot S_p$ . То есть минимизация функции потерь  $L$  определит и минимизацию потерь на радиопрогноз.

Соотношение (1) носит общий характер и может быть применено к любым системам, эффективность работы которых зависит от состояния окружающей среды, что требует соответствующего сервисного прогноза. Вместе с тем это соотношение следует дополнить учетом платы за прогноз, отношение величины которой к  $S_p$  обозначим через  $\alpha$ . Очевидно, что с учетом платы за прогноз в единицу времени величина реальной доли  $P$  уменьшится, а величина потерь  $L$  увеличится на  $\alpha$ . Использование соотношения (1) при радио прогнозировании требует рассмотрения схемы конкретного прогноза какого-либо параметра радиосигнала или радиотрассы. В качестве такого параметра возьмем рабочую частоту  $f$  какого-нибудь средства, входящего в радиосистему. Основным свойством квазисферической ионизированной среды – ионосферы является способность наклонно отражать радиосигналы, что обеспечивает их проникновение за горизонт при выполнении порогового условия непревышения рабочей частотой  $f$  величины максимально применимой частоты (МПЧ) на данной радиотрассе

$$f < \text{МПЧ} \quad (2)$$

Величина МПЧ обладает статистической изменчивостью, которую можно характеризовать функцией плотности вероятности  $\omega(\text{МПЧ})$ . Интервалы времени, в течение которых выполняется неравенство (2), формируют величину  $P$ , при невыполнении – величину  $L$ . Для дальнейшего рассмотрения можно предположить, что МПЧ распределена по нормальному закону, т.е.  $\omega(\text{МПЧ})$  является функцией Гаусса с параметрами: средним  $\overline{\text{МПЧ}}$  и среднеквадратичным отклонением  $(\text{CKO})_{\text{МПЧ}}$ . Распределение  $\omega(\text{МПЧ})$  следует использовать для определения величины  $\beta$ , которую можно определить как вероятность события, выраженного неравенством (2). Очевидно, что выбор рабочей частоты  $f$ , равной среднему значению  $\overline{\text{МПЧ}}$ , приводит к величине  $\beta = 0,5$ . Для увеличения  $\beta$  применяется отстройка по частоте  $\Delta f$  вниз от МПЧ. Вместе с тем известно, что такая отстройка приводит к ухудшению помеховых условий и к увеличению поглощения радиоволн на трассе [1]. Это эквивалентно появлению нового типа потерь  $\gamma$ . В рассматриваемую задачу входит построение моделей связи между величинами  $\alpha, \beta, \gamma$ , входящими в выражение для функций потерь, и переменными  $\Delta f$  и  $m$  – стоимостью прогноза единичной трассы. Для этого введем нормированные величины  $l = L/\Delta P$ ,  $x = \text{МПЧ}/\overline{\text{МПЧ}}$  со среднеквадратичным отклонением  $\text{CKO}_x$  и  $\Delta x = \Delta f / \overline{\text{МПЧ}}$ . Нормированная функция потерь  $l$  может быть представлена в следующем виде:

$$l = \int_{\Delta x / \text{CKO}_x}^{\infty} \omega(x) dx + \frac{\alpha}{\Delta P} + \frac{\gamma}{\Delta P} \quad (3)$$

Первое слагаемое в этой формуле представляет собой вероятность невыполнения неравенства (2), второе – потери, связанные с платой за прогноз, третье – потери, связанные на отстройку  $\Delta f$ . Теперь следует принять достаточно общее модельное предположение о возрастании стоимости прогноза при уменьшении его погрешности. В качестве меры погрешности можно взять величину  $\text{CKO}_x$ . Зависимость  $m(\text{CKO}_x)$  должна иметь отрицательную производную. Более того, можно принять, что существует минимальное предельно достижимое  $(\text{CKO}_x)_{\min}$  и что  $m \rightarrow \infty$  при  $\text{CKO}_x \rightarrow (\text{CKO}_x)_{\min}$ . Простейшей моделью такого типа является соотношение, содержащее единственный первый отличный от нуля член в разложении функции  $m(\text{CKO}_x)$  в ряд Лорана

$$\frac{m}{m_0} = \frac{A}{\text{CKO}_x - (\text{CKO}_x)_{\min}} \quad (4)$$

где  $m_0, A$  и  $(\text{CKO}_x)_{\min}$  – параметры модели. Отметим, что модель (4) является достаточно общей, применимой к широкому классу прогнозов. Относительно

функций  $\alpha$  и  $\gamma$  можно предположить, что первая зависит только от произведения  $m \cdot n$ , где  $n$  - число прогнозов в единицу времени, используемых данной системой, тогда как вторая – только от  $\Delta x$ . Для анализа свойств функции потерь зависимости  $\alpha(m)$  и  $\gamma(\Delta x)$  можно заменить первыми членами их разложения в ряды Тейлора. Таким образом, выражение для функции потерь  $l(m, \Delta x)$  приобретает вид:

$$l(m, \Delta x) = \int_{\Delta x / [A \frac{m_0}{m} + (CKO_x)_{min}]}^{\infty} \omega(x) dx + \frac{m \cdot n}{\Delta P S_p} + \frac{\Delta x}{\Delta x_0} \frac{1}{\Delta P} \quad (5)$$

Нетрудно убедиться в том, что функция потерь (5) имеет экстремумы типа минимума по обоим аргументам. При возрастании стоимости прогноза, когда  $m \rightarrow \infty$  неограниченно возрастает, второе слагаемое суммы (5), соответствующее прямым затратам на прогноз. Переход к дешевым прогнозам  $m \rightarrow 0$  приводит к тому, что первое слагаемое возрастает до величины 0,5. Аналогичная ситуация имеет место при изменении аргумента отстройки  $\Delta x$ .

Минимизации функции потерь (5) может быть осуществлена путем очевидного перехода к системе уравнений  $\frac{\partial l}{\partial m} = 0$ ;  $\frac{\partial l}{\partial \Delta x} = 0$ , что приводит к соотношениям:

$$\omega \left( \frac{\Delta x}{A \frac{m_0}{m} + (CKO_x)_{min}} \right) \frac{\Delta x A \frac{m_0}{m}}{[A \frac{m_0}{m} + (CKO_x)_{min}]^2} = \frac{n}{\Delta P S_p} \quad (6)$$

$$\omega \left( \frac{\Delta x}{A \frac{m_0}{m} + (CKO_x)_{min}} \right) \frac{1}{A \frac{m_0}{m} + (CKO_x)_{min}} = \frac{1}{\Delta P (\Delta x)_0} \quad (7)$$

Решение системы (6) и (7) позволяет определить оптимальные стоимость прогноза  $m_{opt}$  и отстройку  $\Delta x_{opt}$  так, что  $l(m_{opt}, \Delta x_{opt}) = \min \min l$ . Для целей аналитического рассмотрения этой системы следует разделить друг на друга правые и левые части уравнений, что приведет к квадратному уравнению относительно  $m$ . Разложение функции  $\omega(MПЧ)$  в ряд Тейлора по четным степеням сведет систему к биквадратному уравнению. Возможно также нахождение координат точки минимум миниморум методами линейного программирования [2].

В качестве примера развиваемого подхода рассмотрим некоторый условный центр радиосвязи стоимостью  $S_t = 2 \cdot 10^8$  рублей с проектным временем эксплуатации  $T = 20$  лет, что близко по характеристикам к реальности. Годовая плановая капиталоотдача  $S_p = 10^6$  рублей. На рис. 1 представлено семейство сечений  $l(m, \Delta x)$ , при  $\Delta x = 0,1$ ;  $(CKO_x)_{min} = 0,04$ ;  $A = 0,06$ ;  $P = 0,25$ ;  $(\Delta x)_0 = 1$ . Изображенные две кривые соответствуют числу трасс, для которых осуществляется краткосрочный прогноз.

При большем числе трасс оптимальным является дешевый прогноз  $m/m_0 \approx 0,5$ ; при меньшем – более дорогой прогноз  $m/m_0 \approx 1,5$ . Важно отметить, что модельное соотношение (4) охватывает три вида краткосрочного прогнозирования. Первый вид основан на использовании в качестве источника информации о среде сети станций вертикального зондирования ионосферы. При этом  $CKO_x \approx 0,2$ , а себестоимость единичного трассового прогноза (12 - суточных кривых изменения МПЧ от времени суток в различные месяцы года) примерно равна 2500 руб. Второй вид прогноза использует в качестве источника информации сеть станций наклонного зондирования ионосферы. При этом  $CKO_x \approx 0,1$  и  $m = m_0$ , т.е. себестоимость прогноза равна 7000 рублей. Третий вид предполагает использование сети специализированных станций возвратно - наклонного зондирования ионосферы с частотно - азимутальным сканированием [3]. Этому виду соответствует  $CKO_x \approx 0,05$ , а себестоимость будет равна 42000 рублей. Допускается, что возможны комбинированные сети, в которых аргумент  $m$  может принимать непрерывные значения, хотя модель (4) прокалибрована для дискретных  $CKO_x$ .

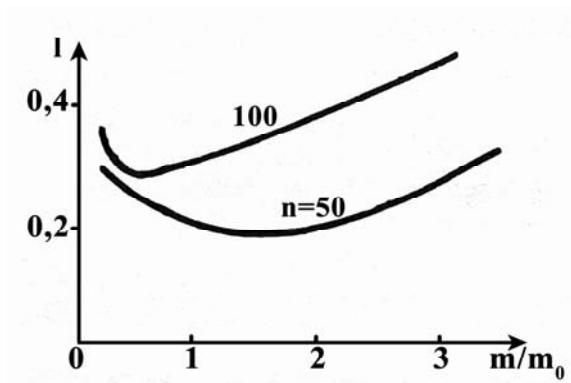


Рис. 1.

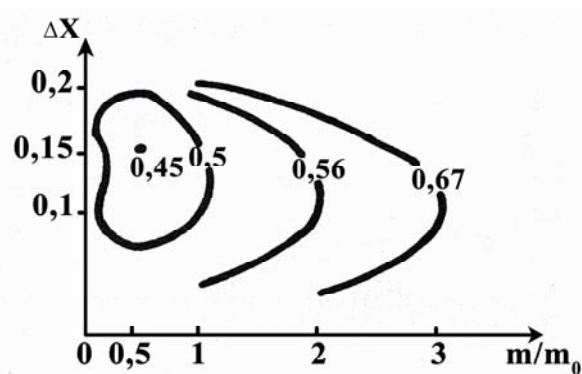


Рис. 2.

На рис. 2 представлен приближенный вид рельефа функции потерь  $l(m/m_0, \Delta x)$ , полученной путем непосредственной табуляции выражения (5) в интервале изменения  $(\Delta x) = 0,03 \div 0,2$  и  $m/m_0 = 0,25 \div 3$ . Точке минимум минимума функции потерь соответствуют значения  $m/m_0 \approx 0,5$  и  $\Delta x \approx 0,15$ . Эти величины параметров адекватны реальным ситуациям, когда  $l = 0,45$  по формуле (3).

В данной работе впервые, получен полезный методический материал как для прикладной геофизики, занимающейся радиопрогнозированием, так и для экономических расчетов условий эксплуатации радиотехнических систем, использующих ионосферу в качестве канала передачи информации. Прогнозы состояния среды должны иметь оптимальную погрешность и стоимость, что при оптимальном выборе рабочих параметров радиосистем обеспечивает минимизацию их функции потерь. Следует отметить, что развиваемый подход применим к широкому классу сервисных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А., Справочник по математике. – М.: Наука, 1988.
3. Гуревич А. В., Калинин Ю. К., Кузьминский Ф. А. и др. //Тез. докл. на XIII Всесоюз. Конференции по распространению радиоволн. – Томск, 1978.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.....	3
Федоров Е. К. Некоторые проблемы развития наук о Земле.....	5
Израэль Ю. А. Радиоактивное загрязнение после ядерных взрывов и аварий - интегральный подход.....	22
Авдюшин С. И., Алпатов В. В., <u>Ветчинкин Н. В.</u> , Петров Н. Н., <u>Романовский Ю. А.</u> Основные направления, методология и результаты исследований верхней атмосферы, ионосферы и околоземного космического пространства с использованием активных экспериментов .....	36
Лапшин В. Б., Гончарук В. В., Гребенникова Т. В., Широков Е. В., Семенов Д. С., Морозов В. Н., Плетенев С. С., Самсонов-Тодоров А. О., Таранов В. В., Плотникова Н. В., Фролова Е. Ю., Сыроешкин А. В. Эхо солнечных бурь и галактических событий у поверхности Земли.....	69
Данилкин Н. П., Котонаева Н. Г. Интерпретация и обработка ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит.....	80
Данилов А. Д. Тренды параметров ионосферного слоя F2 и динамики термосферы.....	99
Нусинов А. А. Исследование долговременных трендов геологическо-геофизических факторов методом кумулятивных индексов.....	121
Нусинов А. А., Казачевская Т. В. Изменчивость крайнего ультрафиолетового излучения Солнца как причина ограничения точности прогноза критических частот слоя F2.....	132
Власов В. И., Чашей И. В., Свидский П. М. Прогнозирование геофизических возмущений по наблюдениям межпланетных мерцаний космических радиоисточников.....	139
Калинин Ю. К., Денисова В. И. Эффективность процесса долгосрочного прогноза данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы.....	159
Калинин Ю. К. Сейсмогенные неоднородности области F2 ионосферы, обнаруженные наземными и спутниковой ионосферной станциями.....	166
Пулинец С. А., Узунов Д. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф.....	173
Хотенко Е. Н. Минимизация потерь при использовании прогноза Максимально применимых частот.....	186