

ГЕОДИНАМИКА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

УДК 550.3
ББК 22.632
ПГ 35

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СБОРНИКА
«ГЕОДИНАМИКА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ»

Ж.Ш. Жантаев (председатель)
Б.К. Құрманов, Б.Т. Жумабаев, Г.Я. Хачикян, А.Ж. Бибосинов,
С.Н. Мукашева, Қ.Е.Нұрғалиева

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
АО «Национальный центр
космических исследований и технологий»
(протокол № 5 19.09.2013)

Под общей редакцией
член-корреспондента НАН РК Ж.Ш. Жантаева

Ответственный редактор:
Доктор физико-математических наук Г.Я. Хачикян

УДК 550.3
ББК 22.632

ISBN 978-601-80431-2-3

© АО «Национальный центр космических
исследований и технологий», 2013
© ДТОО «Институт ионосферы», 2013
© ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», оформление, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследования ионосферы в Казахстане начались в 1943 году с Постановления Совета Министров СССР об образовании при Министерстве связи Казахской ССР Алма-Атинской ионосферной станции, в функции которой входило измерение ионосферных параметров, необходимых для составления прогнозов условий распространения радиоволн на территории СССР, что было крайне актуальным в те военные годы.

В 50-ые годы 20 века начинается активное освоение космоса и на территории Казахстана создается космический комплекс «Байконур». Для обеспечения надежной радиосвязи с космическими аппаратами потребовались глубокие знания о вариациях параметров ионосферы – среды для распространения радиоволн, и в 1961 г. при физико-математическом отделении Академии Наук Казахской ССР создается, под непосредственным контролем академика К.И. Сатпаева, Сектор ионосферы, в состав которого входят три комплексные магнито-ионосферные станции (КМИС): Алма-Атинская, Карагандинская и Новоказалинская.

В 1965-1966 гг. экспериментальная база Алма-Атинской КМИС существенно расширяется – начинаются исследования радиоизлучения Солнца и интенсивности космических лучей на аппаратурном комплексе на высоте 3340 м над уровнем моря. В 1970-х годах проводятся активные исследования волновых процессов в ионосфере, изучается воздействие на ионосферу наземных химических и подземных ядерных взрывов, достижения сотрудников признаются международным научным сообществом, успешно защищаются кандидатские и докторские диссертации, и по Распоряжению Совета Министров и Постановления Президиума Академии Наук Казахской ССР от 7 июля 1983 года, на базе Сектора ионосферы создается Институт ионосферы Академии наук Казахской ССР.

За годы независимости Казахстана Институт становится ведущим научным центром страны в области исследования космической погоды и физики солнечно-земных связей, а в 2011 году происходит новый качественный скачок организации – в структуру Института органично вливается Отдел Наземно-Космического Геодинамического и Геофизического Мониторинга, что существенно расширяет тематику научных и прикладных исследований. К выкристаллизованному в

Институте в предыдущие годы научному направлению «Мониторинг, диагностика и прогноз космической погоды», направленного на обеспечение безопасности космических полетов, сохранности и безаварийности функционирования высокотехнологичного оборудования на Земле и в космосе, бесперебойной работы радио-телекоммуникационных систем, добавляется новое научное направление, связанное с мониторингом, диагностикой и прогнозом геодинамического состояния литосферы, направленного на обеспечение геодинамической и геоэкологической защиты окружающей среды, объектов природопользования и потенциально опасных производств в кризисных (сейсмоопасных) регионах страны.

Выпуск данного сборника приурочен к 70-летию ионосферных исследований в Казахстане и 30-летию создания Института ионосферы. На страницах сборника коллектив Института представляет информацию о тематике проводимых научных исследований, демонстрирует свои достижения в области мониторинга, диагностики и прогноза космической погоды, изучения физики космических лучей, магнитосферных процессов, ионосферы и верхней атмосферы, геомагнитного поля и атмосферного электрического поля, наземно-космического геодинамического мониторинга, физики деформационных процессов, взаимосвязи процессов в различных геосферных оболочках и, в целом, взаимосвязи процессов в системе Солнце-Земля.

ОРГАНИЗАЦИЯ, СТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ

Дробжев В.И., Жумабаев Б.Т., Курманов Б.К., Мукашева С.Н.
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Приведена краткая информация о научно-организационной деятельности Института ионосферы с момента основания и до настоящего времени.

Область применения результатов: науки о Земле, солнечно-земные связи.

Ключевые слова: СОЛНЦЕ, МАГНИТОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, АТМОСФЕРА, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ЛИТОСФЕРА, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ.

Институттың қалыптасу уақытынан бастап қазіргі уақытқа дейінгі ғылыми-ұйымдық қызметі қысқаша ақпарат жүзінде келтірілген.

Нәтиженің қолдану аймағы: Жер туралы ғылым, кун-жер байланысы.

Кілттік сөздер: КҮН, МАГНИТОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, АТМОСФЕРА, МАГНИТ ӨРІСІ, ЭЛЕКТР ӨРІСІ, ЛИТОСФЕРА, ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ.

An information on scientific and organization activity of the Institute of ionosphere from the beginning to the present is given.

The area of application of the results: Earth Sciences, Solar-Terrestrial relationships.

Keywords: SUN, MAGNETOSPHERE, IONOSPHERE, ATMOSPHERE, GEOMAGNETIC FIELD, ELECTRIC FIELD, LITHOSPHERE, GEODYNAMICAL MONITORING

История радиогеофизических исследований в Казахстане началась с Постановления Совета министров СССР об образовании в 1943 г. при Министерстве связи Казахской ССР Алма-Атинской ионосферной станции, в функции которой входило измерение ионосферных параметров, необходимых для составления прогнозов условий распространения радиоволн на территории СССР, что было актуально в те военные годы. Начальником ионосферной станции была назначена Зачатейская Елена Николаевна – одна из первых женщин-радиоинженеров того времени, которая проработала в этой должности до 1961 г.

В начале 50-х годов начинается освоение космоса, строится Байконур. Безопасность полётов в космосе зависит, в том числе, и от надёжности радиосвязи с космическими аппаратами, которая определяется условиями распространения радиоволн в ионосфере. В то время ионосфера из-за сложности происходящих

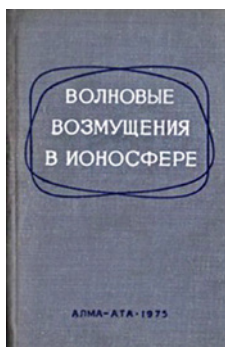
в ней процессов под влиянием различных факторов (воздействие солнечного и космического излучений, причин техногенного характера и т.д.) была мало изучена. Результаты первых исследований околоземного космического пространства с использованием искусственных спутников Земли во время Международного Геофизического Года (МГГ, 1957-1958 гг.) показали, что сеть наземных обсерваторий, изучающих ионосферу, магнитное поле Земли, условия распространения радиоволн, а также интенсивность солнечного и космического излучений должна быть расширена. На территории Казахстана в этот период работала лишь одна ионосферная станция, которая в январе 1960 г. передаётся Академии наук Казахской ССР (АН КазССР). Постановлением Совета министров СССР от 9 апреля 1960 г. на Президиум АН КазССР возлагаются задачи по развитию научно-исследовательских работ в области ионосферы, геомагнетизма и распространения радиоволн, для чего предусматривается строительство трёх комплексных магнито-ионосферных станций (в г. Алма-Ате, г. Караганде и г. Новоказалинске). В 1961 г. под контролем академика К.И. Сатпаева создается Сектор ионосферы, в состав которого входят три комплексные магнито-ионосферные станции: Алма-Атинская, Карагандинская и Новоказалинская, полностью введенные в действие в 1964 г. Научная деятельность Сектора ионосферы по проблеме «Физика верхних слоёв атмосферы» контролировалась Отделением наук о Вселенной и о Земле АН КазССР, координирующим центром был Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук СССР. Заведующей Сектором ионосферы утверждается кандидат физико-математических наук, доцент Томского государственного университета им. В.В. Куйбышева (ТГУ) Мария Петровна Рудина. Вслед за М.П. Рудиной здесь начинают работать талантливые выпускники ТГУ и других престижных ВУЗов СССР, имеющие редкие для того времени специальности радио- и геофизика.

В рамках Программы МГСС (Международный Год Спокойного Солнца) уже к октябрю 1963 г. на трёх станциях (Алма-Атинская, Карагандинская и Новоказалинская), которые вошли в состав Мировой сети ионосферных станций и магнитных обсерваторий, были начаты непрерывные измерения параметров ионосферы и магнитного поля Земли, обработка и отправка данных в Мировой центр сбора данных (МЦД-Б2, г. Москва).

К началу 1964 г. в Секторе ионосферы сложился научный коллектив, способный вести исследования в области солнечно-земной физики. К

этому времени в г. Алма-Ате был создан новый комплекс измерительных радиотехнических установок, значительно расширяющий экспериментальные возможности изучения ионосферных процессов и условий распространения радиоволн, в том числе установок для измерения дрейфа неоднородностей ионизации и коэффициента поглощения радиоволн, оценки напряжённости поля передающих радиостанций, определения величины атмосферных помех. Первые результаты научных исследований сотрудниками Сектора ионосферы были представлены на Всесоюзном совещании по итогам исследований ионосферы во время МГСС, организованного Межведомственным геофизическим комитетом и Проблемным советом при Президиуме АН СССР по распространению радиоволн в Алма-Ате на базе Сектора ионосферы. Факт проведения данного совещания на базе Сектора ионосферы явился безусловным признанием успехов данной молодой научно-исследовательской организации.

В 1965-1966 гг. были начаты исследования радиоизлучения Солнца и интенсивности галактических космических лучей на аппаратном комплексе, установленном на высотах 2740 м и 3340 м над уровнем моря соответственно. В 1970-х годах создается уникальная установка для изучения доплеровского смещения частоты отражённых от ионосферы сигналов при наклонном, а позднее, и вертикальном зондировании, что позволило исследовать тонкую структуру ионизированной плазмы и провести цикл работ по изучению волновых процессов в ионосфере. Эти работы поставили Сектор ионосферы в ряд ведущих организаций в области исследований физики околоземного космического пространства, проводимых в Советском Союзе.



Монографии, изданные в области солнечно-земной физики



В лаборатории распространения радиоволн (1967 г., слева направо: Яковец А., Антонова В.

Особо следует отметить достижения ученых в этот период в исследованиях воздействия наземных химических и подземных ядерных взрывов на ионосферу и разработке дистанционного ионосферного метода контроля взрывов. По данному направлению Институт ионосферы был головным в Советском Союзе. Следует заметить, что американские ученые из Ливерморской лаборатории начали развивать теорию воздействия подземных взрывов на ионосферу в 1977 г., а первый эксперимент в данном направлении был проведен казахстанскими учеными на Семипалатинском полигоне в 1978 г. Американские ученые провели специальный исследовательский взрыв «MILL RACE» 16.09.1981 г., а аналогичный взрыв под Алма-Атой «МАССА» был проведен двумя месяцами позже 28.10.1981 г. [1].

В соответствии с Распоряжением Совета Министров Казахской ССР и Постановлением Президиума АН Каз ССР 7 июля 1983 г. на базе Сектора ионосферы образован Институт ионосферы Академии наук Казахской ССР. Директором института был назначен Виктор Иванович Дробжев, известный специалист в области радио- и геофизики (ныне академик НАН РК). Основными направлениями научных исследований института были определены: солнечно-земные связи, закономерности условий распространения радиоволн, диагностика естественных и искусственных ионосферных возмущений в околоземном пространстве.

В 80-е годы институт проводит исследования по международным программам «Геомагнитный меридиан», ВИТС (глобальные исследования

ионосферы и термосферы), МАП (исследование средней атмосферы), проекту КАПГ (по планетарной геофизике). Особое место здесь занимают исследования по международной программе «Интеркосмос» -исследование ионосферы радиомаяковыми методами с помощью геостационарных и пролетных искусственных спутников Земли (ИСЗ). На Земле была создана целая сеть приемных пунктов по приему сигналов с геостационарных ИСЗ и измерению интегрального электронного содержания. В Казахстане такой пункт создается на экспериментальной базе Института – высокогорного радиополигона «Орбита», расположенного вблизи г. Алматы [43.25°N; 76.92°E].

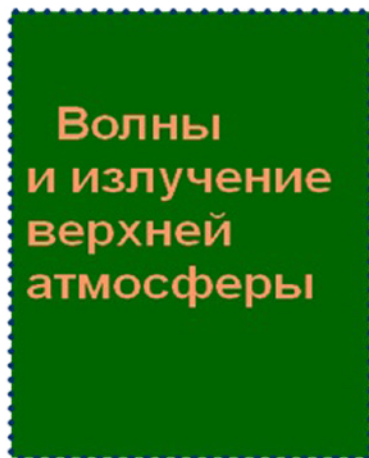
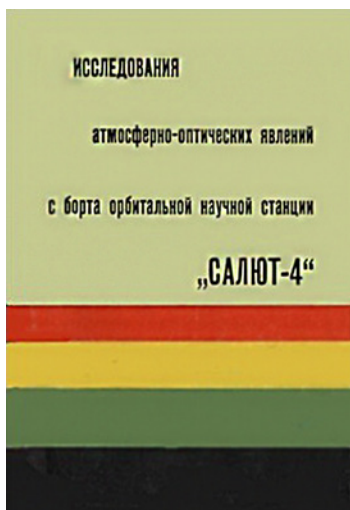
Так, ИСЗ «Интеркосмос-19» был предназначен для комплексного исследования приземной плазмы выше максимума слоя F2 в рамках Международного научного проекта по изучению магнитосферы Земли.

Система ИСЗ «Транзит» являлась удобным инструментом для исследования ионосферы, так как из-за одновременного присутствия на орбите шести спутников можно было осуществлять радиозондирование ионосферы на просвет. Затем был запущен полярный ИСЗ «ИонозондЭ». На радиополигоне «Орбита» пролетный ИСЗ «Ионозонд-Э» находился в зоне приема в течение 10 минут. За это время спутник пролетает 4000 км. Пересчет ионограмм внешнего зондирования позволял получить пространственное распределение профиля электронной концентрации внешней ионосферы на средних широтах от 35° до 50°.

Ученые и специалисты Института выполняли космический эксперимент «Плазмосфера» (1998 г.) на орбитальном комплексе «Мир» с целью разработки физических основ и методических представлений учета влияния ионосферы на канал космической радиосвязи, а также на точность систем спутниковой геодезии и навигации. В рамках данного эксперимента было проведено радиозондирование ионосферы с помощью модернизированной и автоматизированной установки – комплекс «Базис-ИВМ», позволяющий снимать высокочастотные характеристики до высот главного максимума F-области ионосферы с точностью 1,5 км. Выполнены так же измерения приведенной фазы от навигационных спутников системы «Парус-Цикада», позволившие рассчитать полное электронное содержание до высот спутников.

Институт ионосферы принял активное участие в научной программе, выполняемой космонавтами Гречко Г.М. и Севастьяновым В.И. на орбитальных станциях «Салют-4» и Салют-6». По результатам космического эксперимента вышли книги «Исследования атмосферно-оптических явлений с борта научной

станции «Салют-4» (1979 г.) и «Волны и излучение верхней атмосферы» коллектива авторов Авакян С.В., Гречко Г.М., Дробжев В.И., Краснов В.М. и др.



Монографии по научной программе, выполненной космонавтами Гречко Г.М. и Севастьяновым В.И. на орбитальных станциях «Салют-4» и Салют-6» совместно с учеными института

В 1985-1989 гг. проведенный лабораторией космической радиофизики Института ионосферы новый радиофизический эксперимент по приему сигналов от геостационарных ИСЗ предоставил уникальную возможность не только расширить диапазон высот наблюдения ионосферы до 2000 км, но и расширить круг решаемых задач в плане изучения физики ионосферы. Метод данного эксперимента, заключающийся в регистрации угла поворота плоскости поляризации (эффекта Фарадея) принимаемого от геостационарного ИСЗ «ETS-II» высокочастотного радиосигнала с частотой 136,112 МГц, дал качественно новые сведения о состоянии ионосферы, позволил выявить характерные особенности ионосферы для данного региона и явился одним из самых надежных средств контроля ионосферы во время возмущений.

Итак, в Республике Казахстан был создан комплекс уникальных экспериментальных установок и проведены обширные измерения различных параметров околоземного космического пространства:

- Радиополигон «Орбита», расположенный на высоте 2740 м над уровнем моря, включает в себя 12-метровую антенну ТНА-57, которая используется для регистрации радиоизлучения Солнца на двух частотах. На радиополигоне

«Орбита» размещены также приемники спутниковых сигналов и аппаратура для регистрации интенсивности свечения и температуры молекулярного кислорода и гидроксила в районе мезопаузы на уникальном оборудовании SATI, переданном институту Канадским центром по изучению Земли и космоса. Радиополigon «Орбита» также включен в состав международной сети спектрографических наблюдений Солнца на базе приемника CALLISTO, организованной Цюрихским Институтом Астрономии (Швейцария), которая включает 24 пункта (Швейцария, Бельгия, Финляндия, Ирландия, Чешская Республика, США, Бразилия, Россия, Казахстан и др.). Спектрографы позволяют регистрировать радиовсплески Солнца (2, 3 и 4 типов) и прогнозировать геоэффективность вспышечной активности.

- Станция космических лучей, расположенная на высоте 3340 м над уровнем моря, является одной из ключевых в мировой сети станций по космическим лучам. Аппаратура станции включает в себя нейтронный супермонитор 18NM64 с современной системой регистрации и передачи данных в реальном времени, входящий в европейскую базу нейтронных мониторов NMDB (www.nmdb.eu); комплекс детекторов, регистрирующих нейтроны тепловых энергий и установку для регистрации гамма-квантов. Экспериментальные данные высокогорного нейтронного монитора отправляются в мировые центры данных WDC-C2 Nagoya, Japan; WDC-A, Boulder, USA и WDC-B2, Москва, Россия.



Радиополigon «Орбита»

- Геомагнитная обсерватория «Алма-Ата», единственная в среднеазиатском регионе, входящая в международную сеть INTERMAGNET. Данные по геомагнитному полю выставляются на сайте www.gsrg.nmh.ac.uk/intermagnet (Англия, Эдинбург). Имеется Сертификат полноправного членства в INTERMAGNET и качества измерений Геомагнитной обсерватории «Алма-Ата», выданный Техническим секретариатом Международной сети геомагнитных станций INTERMAGNET 23 ноября 2005 г. Данные обсерватории «Алма-Ата» были использованы для создания Мировой Модели Геомагнитного Поля WMM 2010, имеется благодарность от U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) and the UK Ministry of Defence through the Defence Geographic Centre (DGC) за поддержку обсерватории на уровне мировых стандартов. Геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» с 2010 г. входит в международную сеть станций по нормализации Dst-индекса, Dcx index server (University of Oulu, Finland) <http://dcx.oulu.fi>. Обсерватория развивает метрологические работы, связанные с поверкой магнитометрических приборов Казахстана и среднеазиатского региона.

- Ионосферная обсерватория, оснащенная двумя современными ионозондами. Указанный уникальный аппаратный комплекс позволяет проводить в реальном времени диагностику и прогноз состояния околоземного космического пространства на основе регистрации интенсивности космических лучей, напряженности геомагнитного поля, потока радиоизлучения Солнца и электронной концентрации ионосферы. Национальным достоянием Республики Казахстан является примерно 50-летний интегрированный банк экспериментальных гелиогеофизических данных: космических лучей, зарегистрированных на высотах 3400, 1700 и 800 м над уровнем моря; радиоизлучения Солнца; геомагнитного поля; электронного содержания в ионосфере (данные регулярно актуализируются).

Учеными института получен ряд фундаментальных результатов, получивших признание мировой научной общественности и опубликованные в престижных изданиях [1-8].

Разработана концепция волновой природы динамических процессов среднеширотной ионосферы. Впервые получена полная система представлений о явлении волновых возмущений, их происхождении, средствах контроля, методах обработки и интерпретации результатов. Это дало возможность разработать динамическую модель ионосферы, которая используется для адаптации различных радиосредств (при навигации, пеленгации, радиосвязи и радиовещании) и

повышении их качества. Волновая концепция получила признание основных коллективов исследователей среднеширотной ионосферы и, как результат, стало успешное выполнение Всесоюзной программы «Волновые возмущения» (координатор – Институт ионосферы) в реализации которой приняли участие 20 академических и вузовских организаций СССР.

Развито научное направление – изучение взаимодействий трех сред: атмосферы-ионосферы-магнитосферы, протекающих при интенсивных явлениях в нижней атмосфере и на поверхности Земли как естественного, так и антропогенного характера. Проведение учеными института ряда уникальных широкомасштабных экспериментов, например, хорошо известного в стране и за рубежом проекта «МАССА» (в выполнении участвовало 15 научно-исследовательских организаций страны), позволило доказать эффективность воздействия на околоземное космическое пространство сейсмических явлений, взрывов, исследовать проникновение гравитационных и акустических волн до высот ионосферы, обнаружить существование атмосферно-ионосферных связей неакустической природы, трансформацию акустических волн с Земли в электромагнитные возмущения различных типов. Это дало возможность более целенаправленно изучать воздействие солнечно-земных связей на ионосферу, распространение радиоволн, возникновение землетрясений, погоду, на представителей биосферы и др. Результаты этих исследований были, в частности, реализованы в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова,, в ряде организаций Министерства промышленности средств связи и Министерства радиопромышленности СССР, в Министерстве связи и Министерстве обороны Республики Казахстан.

Институт ионосферы явился основоположником теории и нового направления в космофизике – исследования переходных процессов в околоземном космическом пространстве в области солнечного терминатора. Теоретические расчеты нашли экспериментальное подтверждение посредством изучения пространственно-временных, сезонных, суточных особенностей генерации волн солнечным терминатором для различных широт, включая высоты магнитосферы. Развивается теория солнечного терминатора в рамках неравновесной термодинамики, позволяющего учесть каналы обмена энергией между различными слоями атмосферы и их изменение при вариациях внешних факторов. Теоретически и экспериментально доказана существенная роль неравновесных эффектов в спектрах собственных колебаний атмосферного газа в потоке солнечной

радиации. Разработана модель, которая дает возможность адекватно учитывать распространение акустических волн в неоднородной атмосфере, а также впервые позволяет описать взаимодействие акустических волн в неоднородной атмосфере.

Разработана региональная модель ионосферы для Казахстана, корректируемая ионосферным индексом солнечной активности, что позволило, в частности, выдавать соответствующий прогноз условий распространения радиоволн силовым структурам страны.

Построена теоретико-групповая модель развитой турбулентности, что обеспечивает базу для создания пакетов численных программ для расчета практических важных турбулентных явлений, связанных с процессами перемешивания, распыления, турбулентного обтекания тел и т.д.

Результаты указанных исследований получили широкое практическое применение при улучшении качественных показателей радиотехнических систем связи, навигации и пеленгации, в разработке новых радио- и геофизических методов обнаружения ядерных взрывов, пуска космических аппаратов и прогноза землетрясений. В частности, в институте развит новый ионосферный метод обнаружения, идентификации и оценки мощности (в т.ч. малой) подземных ядерных взрывов. Интересные результаты получены по изучению влияния пусков ракетносителей с космодрома «Байконур» на околоземное космическое пространство.

В связи с требованием времени Институт ионосферы прошел следующие реорганизации (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Краткая справка о реорганизациях Института ионосферы

№	Наименование организации	Год	Основание
1	Алма-Атинская ионосферная станция при Министерстве связи Казахской ССР	1943 г.	Постановление Совета Министров СССР об образовании в 1943 г. при Министерстве связи Казахской ССР Алма-Атинской ионосферной станции.
2	Сектор ионосферы при физико-математическом отделении Академии наук Казахской ССР (АН Каз ССР)	1961 г.	В 1961 г. при физико-математическом отделении Академии Наук Казахской ССР (АН Каз ССР) под контролем академика К.И. Сатпаева создается Сектор ионосферы, в состав которого входят три комплексные магнитно-ионосферные станции: Алма-Атинская, Карагандинская и Новоказалинская.
3	Институт ионосферы АН Каз ССР	1983 г.	Постановление Совета Министров Казахской ССР от 21 июня 1983 г. № 270 «Об организации Института ионосферы Академии наук Казахской ССР».
4	Институт ионосферы Министерства науки-Академии наук Каз ССР	1996 г.	Указ Президента Республики Казахстан № 2895 от 11 марта 1996 года «О мерах по совершенствованию системы государственного управления наукой в Республике Казахстан», Приказ Министра науки-Президента Академии наук республики Казахстан № 185 от 31 декабря 1996 г. «Об Институте ионосферы Министра науки-Академии наук Республики Казахстан».
5	Республиканское государственное казенное предприятие «Институт ионосферы» Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан	1999 г.	Постановление Правительства Республики Казахстан № 1080 от 30 июля 1999 года «О реорганизации государственных учреждений Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан» Институт ионосферы преобразован в республиканское государственное казенное предприятие.
6	Республиканское государственное казенное предприятие «Институт ионосферы» Министерства образования и науки Республики Казахстан	2000 г.	Указ Президента Республики Казахстан № 235 от 13 октября 1999 г. «О мерах по совершенствованию структуры государственных органов Республики Казахстан и уточнению их компетенции» и Постановление Правительства Республики Казахстан № 1754 от 19 ноября 1999 г. «Вопросы Министерства образования и науки Республики Казахстан».
7	Дочернее государственное предприятие «Институт ионосферы» РГП «Центр астрофизических исследований» Министерства образования и науки Республики Казахстан	2004 г.	Решением Правительства Республики Казахстан согласно постановлению Правительства Республики Казахстан № 280 от 5 марта 2004 г. «Вопросы некоторых республиканских государственных предприятий Министерства образования и науки Республики Казахстан».
8	Департамент «Институт ионосферы» АО «Национальный центр космических исследований»	2008 г.	Постановление Правительства Республики Казахстан № 38 от 22.01.2008 г.
9	Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью «Институт ионосферы»	2010 г.	Приказ Национального космического агентства Правительства Республики Казахстан № 65/ОД от 17 августа 2009 г. «Некоторые вопросы акционерного общества «Национальный центр космических исследований и технологий».

В первые годы независимости Казахстана по Поручению Президента страны Н.А. Назарбаева под руководством Президента Академии наук Казахской ССР Султангазина У. М. и непосредственном участии директора Института ионосферы Дробжева В.И. [9] была сформирована первая программа космических экспериментов, положившая начало исследований казахстанских

космонавтов. Во время выполнения Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы», так же сформированной при участии ученых Института ионосферы, были заложены основы для дальнейшего развития его научной и экспериментальной базы:

- создана станция контроля космического пространства на радиополигоне «Орбита», включающая в себя системы приема сигналов космических аппаратов, потока радиоизлучения Солнца на частотах 1 и 3 ГГц (аналогичная установка имеется только в Канаде), а также оптические установки для регистрации эмиссии ночного неба;

- модернизированы казахстанские наземные установки по регистрации космических лучей, расположенные на высотах 800, 1700 и 3340 м над уровнем моря;

- гелио-геофизические комплексы Казахстана были объединены в единую систему мониторинга околоземного космического пространства и был разработан программный комплекс, обеспечивающий функционирование казахстанской системы мониторинга в режиме реального времени;

- создан и регулярно актуализируется интегрированный банк экспериментальных гелиогеофизических данных: многоуровневой системы космических лучей на высотах 3400, 1700 и 800 м над уровнем моря; радиоизлучения Солнца; геомагнитного поля; электронного содержания в ионосфере.

Перечисленное способствовало:

- созданию методики раннего предупреждения начала солнечного нейтронного возрастания на основе мониторинга возможностей сети нейтронных мониторов в реальном масштабе времени;

- разработке методики определения начала наземного возрастания солнечных космических лучей на основе анализа потока ренгеновского излучения 0,1-0,8 nm, потока протонов с энергией >100MeV по данным спутника GOES, нескольких высокоширотных и одного низкоширотного нейтронного монитора (г. Алматы);

- созданию расширенной казахстанской системы радиационного мониторинга околоземного пространства с выборкой и представлением на странице сайта гелиогеофизических данных института данных высокоширотной станции «Oulu» (Финляндия) в графическом и текстовом виде. Расширенная система позволяет регистрировать и анализировать в реальном времени повышения радиационной обстановки в космическом пространстве, которые могут не проявиться на

наземных станциях космических лучей средних широт.

Итак, в Казахстане создана многоуровневая система мониторинга и прогноза космической погоды, направленной на контроль и прогнозирование уровня радиационной и электромагнитной обстановки в космическом пространстве и являющейся составной частью международной системы, а также разработан ряд методов прогноза космической погоды. Это крайне важно для принятия предупредительных мер по избежанию негативных последствий от воздействия факторов околоземного космического пространства на функционирование наземных и космических технологических систем. Результаты научных исследований, основанные на данных современного мониторинга состояния космического пространства, публикуются в международных рейтинговых изданиях, представляются на международных научных форумах.

В 2011 г. в состав Института вошел отдел наземно-космического, геодинамического и геофизического мониторинга, что расширило научные направления. В рамках программы «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» на основе наземно-космического комплекса мониторинга геодинамической обстановки, основанного на применении GPS-технологий, интерферометрических методов дистанционного зондирования Земли, а также с использованием методов математического моделирования геомеханических процессов в земной коре на современном уровне ведутся работы [10-16]:

- по геодинамическому мониторингу, определению напряженно-деформированного состояния земной коры в наиболее сейсмоопасных регионах Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау;

- по разработке научно-обоснованных технологий наземно-космических мониторинговых наблюдений за развитием геодинамических процессов на территории Прикаспийского региона и прогнозирования месторождений углеводородного сырья, необходимых для контроля чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли (аварийные выбросы нефти и газа на месторождениях магистральных и внутрипромысловых трубопроводах, разливы нефти на акватории Каспийского моря). Результаты работ позволят в Прикаспийском регионе Казахстана провести районирование территории и выделять области энергонасыщенности и разуплотнённости земной коры, являющихся критериями сейсмогенности и нефтеперспективности, целенаправленно и избирательно подходить к выбору места бурения разведочных скважин;

- по разработке методов математического моделирования и спутниковых исследований напряженно-деформированного состояния системы «грунт-сооружение» для промышленных агломераций и городов с высотной застройкой, которые могут быть приняты за основу при контроле особо ответственных участков хозяйственных объектов большой протяженности (состояния ирригационных систем и гидротехнических сооружений). В рамках темы на основе данных глобальной и локальной сети GPS-станций ведутся работы по определению трендовых движений земной поверхности для территорий городов Алматы и Астаны, даются рекомендации сейсмической устойчивости по этажности вновь возводимых зданий, виду и параметрам фундамента и др.

Таким образом, в настоящее время приоритетными научными направлениями ДТОО «Институт ионосферы» являются:

- наземно-космический геодинимический и геофизический мониторинг земной коры Казахстана;
- солнечно-земная физика и прогноз космической погоды.

Результаты исследований Института по каждому из указанных двух направлений с учетом результатов, полученных международным сообществом ученых, показали тесную взаимосвязь связь между ними. Установлено, что с одной стороны, характеристики околоземного космического пространства (ионосфера, магнитосфера, радиационный пояс Земли) откликаются на активизацию геодинимических процессов в литосфере, а, с другой стороны, геодинимические процессы в литосфере откликаются на активизацию процессов на Солнце и в околоземном космическом пространстве (на вариации космической погоды) [17].

В заключение следует сказать, что исследования Института ионосферы позволят внести определенный вклад в реализацию задач, сформированных в Послании Главы государства по программе форсированного индустриально-инновационного развития страны в направлении «Развитие космической деятельности».

Литература

1. *Альперович Л.С., Гохбер М.Б., Дробжес В.И., и др.* Проект МАССА — исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли». 1985. - № 11. - С. 5-8.
2. *Дробжес В.И., Куделин Г.М., Нургожин Б.И., Пеленицын Г.М. и др.* Волновые возмущения в ионосфере // Алма-Ата, Изд-во «Наука». –1975.–178 с.
3. *Дробжес В.И., Авакян С.В., Краснов В.М., Кудряшов Г.С.* Волны и излучение верхней атмосферы // Алма-Ата, Изд-во «Наука». –1981, –190 с.
4. *Альперович Л.О., Вугмейстер Б.О., Гохберг М.Б., Дробжес В.И.* Об опыте моделирования магнитосферно – ионосферных эффектов при сейсмических явлениях//Доклады Академии наук СССР.–1983.–Т.269, № 3. –С.37-43.
5. *Gorokhovski M., Saveliev V.L.* Statistical universalities in fragmentation under scaling symmetry with a constant frequency of fragmentation. //Journal of Physics D: Appl. Phys. – 2008. –Vol. 41 –P.085405.
6. *Yakovets A.F., Vodyannikov V.V., Gordienko G.I., Ashkaliev Ya.F., Litvinov Yu.G., Akasov S.B.* Response of the nighttime midlatitude ionosphere to the passage of an atmospheric gravity wave. //Geomagnetism and aeronomy. – 2008.– Vol. 48, No 4.– P. 511-517.
7. *Сомсиков В.М.* Солнечный терминатор и динамика атмосферы// Наука, Алма-Ата.–1983.–129 с.
8. *Мукашева С.Н., Докучаева А.В.* Эффекты ионосферных бурь в интегральном электронном содержании// Геомагнетизм и аэрномия.–1990.–Т.30, № 3. –С. 435-439.
9. *Назарбаев Н.* Казахстанский путь //Караганда. –2006.–372 с.
10. *Жантаев Ж.Ш., Щерба Ю. Г., Курманов Б. К., Асанкулов Н. А., Садыков К.А.* Расчеты полей движения и их производных по обновленным исходным данным первичной обработки GPS-наблюдений для Северо-Тянь-Шаньского региона//Известия Национальной академии наук РК, серия физико-математическая. – 2012 –С.52-58.
11. *Zhantayev Zh.Sh., Breusov N.G. et. al.* Ground-Space Monitoring of the Geodynamics of North Tien-shan Region// Abstract Book of the Third International Symposium On Earth Quake Monitoring And Early Warning by Using Space Technology, Beijing.– 2011.– P. 30-31.
12. *Жантаев Ж.Ш., Бибосинов А.Ж.* Использование распределения скоростных неоднородностей в разработке геодинамического обоснования систем GPS наблюдений в прикаспийском регионе. Материалы международной конференции «Космос на благо человечества - Взгляд в будущее» 6-7 января 2011 г., Астана.–С.43-44.
13. *Жантаев Ж.Ш., Бреусов Н.Г.* Роль космических технологий в обеспечении безопасности при добыче углеводородного сырья на территории Казахстана. Материалы международной конференции «Космос на благо человечества - Взгляд в будущее » 6-7 января 2011 г., Астана, с. 41-42.;
14. *Жантаев Ж.Ш., Абсаметов М.К., Копелевич О.В., Намвар Р.А.-А.*

«Использование данных спутниковых сканеров цвета для экологического мониторинга Каспийского моря»// Журнал «Нефть и газ» МОН РК, НАН РК и НИА РК.-2011, № 2.-С. 84-93.

15. *Жантаев Ж.Ш., Мухамедгалиев А.Ф., Бреусов Н.Г.* Система комплексного мониторинга нефтяных разливов в акватории Каспийского моря// Журнал «Нефть и газ» МОН РК, НАН РК и НИА РК.-2011, № 2.-С.119-127.

16. *Жантаев Ж.Ш., Курманов Б.К., Бибосинов А.Ж., Садыков К.А., Шапык Т., Калдыбаев А.А.* Изучение современных движений земной коры города Алматы методами космической геодезии // Известия НАН РК, серия физико-математическая. – 2012 , № 4.– С.46-51.

17. *Жантаев Ж.Ш., Курманов Б.К., Хачикян Г.Я., Ким А.С., Жумабаев Б.Т.* Литокосмическая погода (современное состояние проблемы) – настоящий сборник.

ЛИТОКОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА
(СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ)

Жантаев Ж.Ш., Курманов Б.К., Хачикян Г.Я.,
Ким А.С., Жумабаев Б.Т.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Приведен краткий обзор результатов исследований по влиянию литосферных процессов на характеристики околоземного космического пространства, а также по влиянию космической погоды на литосферные процессы. Даны рекомендации по развитию исследований в данном направлении.

Область применения результатов: науки о Земле, солнечно-земные связи.

Ключевые слова: ЛИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ, ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ, СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Литосфералық процестердің әсерлерінен жер айналасындағы ғарыштық кеңістіктің мінездемесі, сонымен қатар ғарыштық ауа-райының литосфералық процестерге әсері зерттеу нәтижелерінің қысқаша шолу ретінде келтірілген. Осы бағыттағы зерттеулерді дамытуға ұсыныстар келтірілген.

Нәтиженің қолдану аймағы: жер туралы ғылымда, жерлік-сәулелік байланыстарда.

Басты сөздер : ЛИТОСФЕРАЛЫҚ- ИОНОСФЕРАЛЫҚ БАЙЛАНЫСТАР, ҒАЛАМДЫҚ ЭЛЕКТРЛІК ҚАТАР, СӘУЛЕЛІК БЕЛСЕНДІЛІК, ЖЕРДІҢ СЕСМИКАЛЫҒЫ.

A brief review of research on the influence of tectonic processes on the characteristics of the near-Earth space, and on the impact of the space weather on the lithospheric processes as well is presented. The recommendations on the development of research in this area are given.

The area of application of the results: Earth Sciences, Solar-Terrestrial relationships.

Keywords: LITHOSPHERE-IONOSPHERE COUPLINGS, GLOBAL ELECTRICAL CIRCUIT, SOLAR ACTIVITY, EARTH SEISMICITY

Введение

Более 15 лет назад в солнечной-земной физике появился новый для того времени термин «космическая погода», характеризующий изменения на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере, которые могут повлиять на работу и сохранность бортовых и наземных технологических систем, на состояние различных геосфер, и угрожать здоровью и жизни людей [1]. Исследования космической погоды, проводимые, в том числе, в Казахстане [2] показали, что ее состояние на высотах ионосферы, магнитосферы, радиационных поясов, зависит не только от процессов на Солнце и в межпланетной среде, но зависит также от процессов в литосфере [3, 4 и ссылки внутри]. Эти результаты создали основу для введения в солнечно-земную физику еще одного нового термина - «литокосмическая погода», инициатором которого был профессор К. Yumoto (Space Environment Research Center, Kyushu University, Japan) - организатор международной сети магнетометров MAGDAS для изучения космической и литосферной погоды [5]. В 2011г была проведена первая международная школа по вопросам литокосмической погоды (в рамках проектов MAGDAS и ISWI (International Space Weather Initiative) с выпуском сборника избранных статей по данной тематике [6]. В данной статье приведен краткий обзор результатов по теме: литокосмическая погода, и обозначены некоторые дальнейшие шаги для развития исследований в данном направлении.

1. О влиянии литосферных процессов на космическую погоду

Результаты наблюдений

28 марта 1964г. на Аляске произошло землетрясение с магнитудой $M=9.2$ (координаты эпицентра - $61.1N, 147.6W$), а спустя 19 минут после сейсмического толчка ионосферная станция Адак, ($51.9N, 176.6W$) зарегистрировала возмущения в характеристиках ионосферы [7]. Это был первый задокументированный факт связи процессов в системе литосфера-ионосфера. Для экспериментального подтверждения нового факта было проведено восемь наземных химических взрывов - активных экспериментов МАССА (Магнитосферно-Атмосферные Связи при Сейсмо-Активных явлениях), первый из которых (МАССА-1) был проведен с участием Института ионосферы вблизи г. Алматы (Илийская впадина) 28 ноября 1981г [8]. В дополнение к этим активным экспериментам был изучен отклик ионосферы на подземный ядерный взрыв, проведенный на полигоне «Невада»

[9], что подтвердило неслучайность реакции ионосферы на механические нарушения сплошности земной коры и, очевидно, на землетрясения.

Возник вопрос:

Не реагирует ли ионосфера и на процесс подготовки землетрясения, что можно было бы использовать для прогноза сейсмических событий.

Поиск ответа на этот вопрос проводится уже не одно десятилетие [3, и ссылки внутри] и для специалистов по физике ионосферы стал привычным термин «ионосферные предвестники землетрясений». Однако, ионосферные предвестники убедительно выявляются лишь по ретроспективным данным, физический механизм литосферно-ионосферных связей пока не понят и надежные методы краткосрочного прогноза места, времени и магнитуды землетрясения по ионосферным предвестникам пока не разработаны. Такая ситуация говорит о необходимости более глубокого анализа эффектов литосферно-ионосферных связей, но не с целью прогноза землетрясений, а для развития фундаментальных знаний о взаимосвязи геосферных оболочек, включая литосферу и ионосферу. В будущем такие знания несомненно явятся научной основой для разработки надежного метода ионосферного прогноза землетрясений.

Наиболее яркие эффекты литосферно-ионосферных связей накануне землетрясений получены по данным спутников и GPS станций. Так, на рисунке 1 представлен результат анализа данных ИСЗ «Intercomos-19» из работы [10]. Показана пространственная картина распределения отклонений критической частоты ионосферного слоя F2 от медианных значений за 64 часа до землетрясения с магнитудой $M=6.9$, произошедшего 23 ноября 1980 года с координатами эпицентра 40.91N, 15.37E (черный круг в северном полушарии). Красным цветом показаны районы положительных отклонений критической частоты, а синим – отрицательных. Черный круг в южном полушарии является магнитосопряженной точкой для эпицентра данного землетрясения.

Из рисунка 1 видно, что за 64 часа до события критические частоты слоя F2 были понижены в северном полушарии, несколько южнее эпицентра, и одновременно они были понижены в южном полушарии, несколько севернее магнитосопряженной для эпицентра точки. Критическая частота слоя F2 характеризует величину электронной концентрации в главном максимуме ионосферы, расположенном на высоте ~300-350 км. Поскольку на рисунке 1 области аномально

низких значений электронной концентрации (синие зоны) сдвинуты по широте относительно эпицентра и его магнитосопряженной точки, авторы работы [10] сделали предположение, что в период подготовки землетрясения возмущается плазменное состояние по всей длине магнитной силовой трубки, погруженной в северном полушарии в зону подготовки очага, а в южном полушарии – в магнитосопряженную с очагом зону.

Это предположение поддержали результаты исследования землетрясения с $M=7.3$, которое произошло в южном полушарии (Новая Гвинея) 16 июля 1980г в 19.94 UT с координатами эпицентра [$3.2^{\circ}S$; $143.3^{\circ}E$] [3]. Анализ показал, что за 24 часа до события отрицательная аномалия в критических частотах слоя F2 наблюдалась севернее эпицентра, расположенного, в данном случае, в южном полушарии.

Предположение о возмущенности плазменного состояния магнитной силовой трубки в период подготовки землетрясения поддержали и результаты работы [11], где изучались вариации полного электронного содержания (ПЭС) по данным 50 GPS станций в связи с землетрясением в Калининградском регионе 21 сентября 2004г с магнитудой по шкале Рихтера $M \sim 4.9$, с координатами эпицентра [$54.86^{\circ}N$; $19.98^{\circ}E$]. Примерно за сутки до землетрясения наблюдалась положительная аномалия ПЭС, которая была расположена южнее эпицентра землетрясения.

Геомагнитная сопряженность ионосферных аномалий в связи с землетрясениями выявлена также в работах [12, 13], при этом магнитная сопряженность наблюдается не только для плазменных характеристик (электронная концентрация) но и для характеристик электрического и магнитного полей [14]. На основании экспериментальных результатов было сделано заключение [3, 10, 12-13], что в период подготовки землетрясения изменяется как плазменное, так и электромагнитное состояние магнитной силовой трубки, погруженной в будущий очаг землетрясения, причем оно изменяется по всей длине трубки между магнитосопряженными районами.

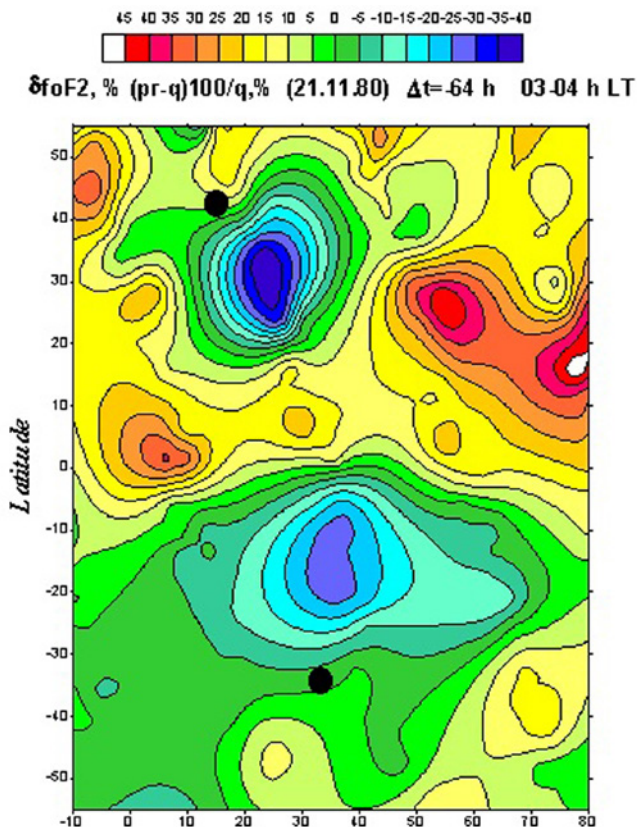


Рисунок 1 – Геомагнитная сопряженность отклонений критической частоты слоя F2 от медианных значений за 64 часа до землетрясения с магнитудой $M=6.5$, произошедшего 23 ноября 1980 года с координатами эпицентра $[40.91N; 15.37E]$ (черная точка в северном полушарии и его магнитосопряженная точка в южном полушарии) по данным спутника Intercomos-19 из работы [10]

Теоретические оценки. При поиске физической причины геомагнитной сопряженности плазменных и электромагнитных аномалий в характеристиках околоземного космического пространства накануне землетрясения, в настоящее время обращаются [15] к концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Истоки концепции ГЭЦ восходят к 20 годам прошлого века – гипотезе Вильсона [16] о грозовых тропосферных генераторах, обеспечивающих зарядку сферического конденсатора земля–ионосфера и стационарное электрическое состояние невозмущенных атмосферных областей (районов хорошей погоды) [17]. Современные исследования ГЭЦ более широкомасштабные [18-20] и сосредоточены на изучении не только тропосферных (грозовых генераторов), но

и ионосферных генераторов (ионосферное динамо, обеспечивающее разность потенциалов между высокими и низкими широтами) а также магнитосферных генераторов (магнитосферное динамо, обеспечивающее потенциал поперек полярной шапки).

На схематичном рисунке 2а представлен общий вид ГЭЦ [18], а на рисунке 2б - электрическая схема такой цепи [20]. По оценкам, непрерывная грозовая деятельность планеты (каждую секунду происходит в среднем 46 молниевых разрядов) может обеспечивать разность потенциалов между землей и ионосферой в пределах 200–600 кВ, общий ток атмосферно-ионосферной электрической цепи может достигать $\sim 2000\text{A}$, а глобальное электрическое сопротивление $\sim 230\ \text{Ом}$ [21]. Ионосферные генераторы (ионосферное динамо) могут обеспечить разность потенциалов между высокими и низкими широтами $U = \sim 5\text{-}15\ \text{kV}$, а магнитосферные генераторы (магнитосферное динамо) способны обеспечить потенциал поперек полярной шапки $U = \sim 40\text{-}130\ \text{kV}$ [18, 19]. Плотность вертикального электрического тока проводимости в ГЭЦ составляет $\sim 10^{-12}\ \text{A/m}^2$ [19]. Электрический ток в ГЭЦ направлен вверх над регионами грозовой деятельности и вниз - над регионами хорошей погоды. - e1 –генератор ЭДС на магнитопаузе, управляемый энергией солнечного ветра; - e2 –тропосферный (грозовой) генератор; - e3 – литосферный генератор;

- $R_i, R_s, R_t, R_{in}, R_e$ – сопротивления, соответственно, ионосферы, стратосферы, тропосферы, внутриземных слоев, земной коры;

- R_{is}, R_{st}, R_{te} – сопротивления, соответственно, между ионосферой и стратосферой, стратосферой и тропосферой, тропосферой и земной поверхностью.

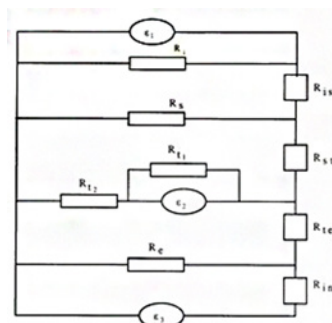
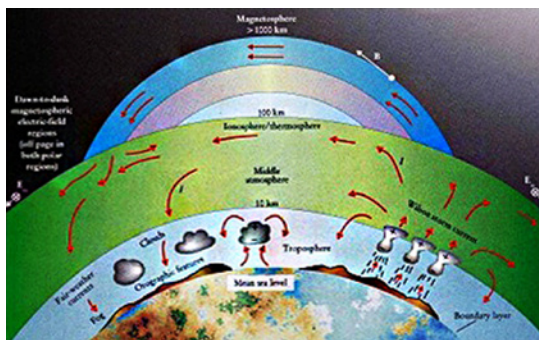


Рисунок 2. а) - Общий вид глобальной электрической цепи (ГЭЦ) из работы [18], б) - электрическая схема ГЭЦ из работы [20].

В настоящее время полагают, что за возникновение вертикального электрического тока в регионах хорошей погоды отвечают три основных источника ионизации приземного слоя воздуха: изотопы радона, земное гамма-излучение и космические лучи. Эманации радона и гамма-излучение наблюдаются вблизи сейсмически активных разломов [22]. Также, за несколько дней до землетрясения в атмосфере может наблюдаться увеличение концентрации радиоактивных газов и почвенных аэрозолей, содержащих ионы металлов [23, 24]. Атмосферные ионы прилипают к почвенным аэрозолям, изменяя проводимость атмосферы и электрические заряды на аэрозолях. Турбулентный перенос вверх заряженных аэрозолей, их гравитационное оседание и изменение электрического заряда в результате прилипания к аэрозолям атмосферных ионов являются причиной формирования в атмосфере над сейсмическим регионом сторонних токов [25, 26]. Значения сторонних токов на поверхности Земли связаны с характеристиками инжектируемых аэрозолей следующими соотношениями [25]:

$$j_{p0} = 4\pi\sigma_0 e Z_p h_p N_{p0}; \quad j_{n0} = 4\pi\sigma_0 e Z_n h_n N_{n0}$$

где: σ_0 - проводимость атмосферы вблизи земной поверхности; Z_p - электрический заряд частиц (положительный/отрицательный), Z_n - концентрация положительно / отрицательно заряженных частиц вблизи земной поверхности, h_p - вертикальный масштаб пространственного распределения сторонних токов в атмосфере. В работе [26] получено уравнение для определения высотного распределения стороннего тока j_e в виде:

$$j_{p0} = 4\pi\sigma_0 e Z_p h_p N_{p0}; \quad j_{n0} = 4\pi\sigma_0 e Z_n h_n N_{n0}$$

где z - высота, σ - проводимость, w - скорость гравитационного оседания аэрозолей, K - коэффициент переноса монодисперсных аэрозолей. Возникновение электрических токов на высотах стратосферы связано с ионизацией нейтрального газа космическими лучами [27]. По оценкам, космические лучи вносят в процесс ионизации воздуха до 20%.

Идея электрической связи между ионосферой и районом подготовки очага землетрясения была недавно использована в работе [28] для объяснения одного из результатов спутника ДЕМЕТЕР - понижения интенсивности естественного радиоизлучения в диапазоне частот 1.6–1.8 кГц накануне коровых землетрясений с магнитудой 5.0 и более [29]. На рисунке 3 приведена схема из работы [28], показывающая участок глобальной атмосферной электрической цепи в районе

«хорошей погоды», где электрический ток направлен вниз. Вверх ток направлен на противоположном участке цепи, где работают тропосферные грозовые генераторы, поддерживающие разность потенциалов между землей и ионосферой.

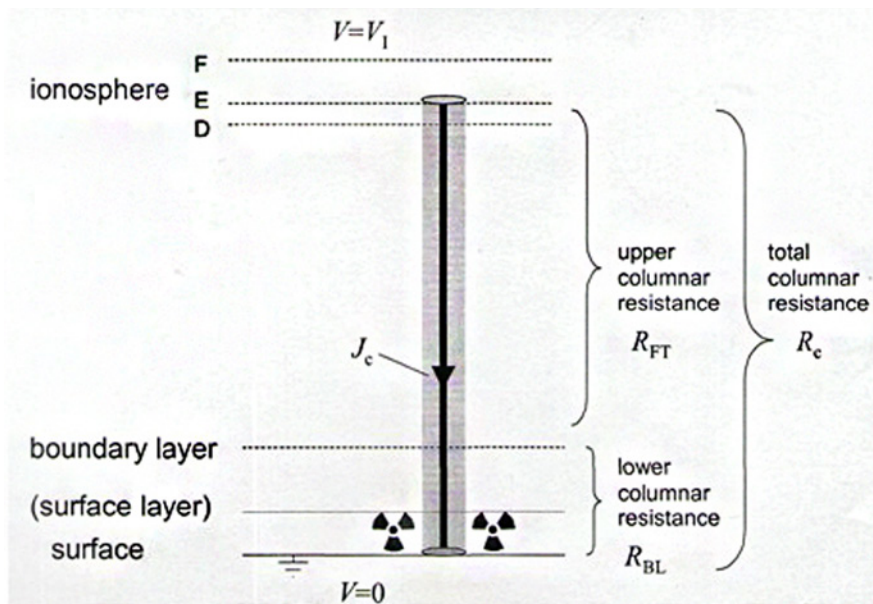


Рисунок 3 - Схема участка атмосферно-ионосферной электрической цепи в районе «хорошей погоды» из работы [28]

На рисунке 3 обозначены: J_c – ток проводимости, направленный вниз, R_c – общее сопротивление столба атмосферы, которое складывается из сопротивления пограничного слоя атмосферы R_{BL} , и сопротивления вышележащего столба свободной атмосферы R_{FT} . Разность потенциалов между земной поверхностью и ионосферой на высоте ~ 80 км задавалась равной 250 кВ. Из-за ограниченной проводимости воздуха (большого сопротивления), плотность тока (J_c), протекающего в районе хорошей погоды, невелика и составляет порядка 2 пА/м^2 [28]. Пограничный слой атмосферы (R_{BL}) простирается от земной поверхности до высоты порядка 2 км, и в среднем, на долю сопротивления пограничного слоя атмосферы R_{BL} приходится до 93% от общего сопротивления R_c , а на долю сопротивления свободной атмосферы R_{FT} – только 7%. Поэтому, вариации проводимости (сопротивления) пограничного слоя R_{BL} , которые могут возникать за счет ионизации атмосферы литосферными газами (в том числе, радоном) могут вносить существенный вклад в вариации общего сопротивления R_c . На такую возможность

указывают, например, результаты работы [23], где по данным анализа примерно 300 микро-землетрясений ($M < 4.0$) показано, что в 75 % случаев им предшествовали значительные повышения концентрации радона. Выражение для полного сопротивления столба атмосферы R_c в работе [28] представлено в виде:

$$R_c = \frac{k}{\sigma_s} + R_{FT}$$

где k – проводимость воздуха в пограничном слое атмосферы со шкалой высот k . Выражение для проводимости представлено в виде:

$$\sigma_s = 2n\mu e = \mu e \frac{\left[\sqrt{(\beta Z + 4\alpha q) - \beta Z} \right]}{\alpha}$$

где n – средняя концентрация малых ионов, μ – средняя подвижность ионов ($1.2 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$) α – коэффициент ион-ионной рекомбинации ($1.6 \times 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) e – заряд электрона, Z – концентрация монодисперсных аэрозолей и β – коэффициент прилипания ион-аэрозоль, который равен ($4 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) для аэрозолей с радиусом 0.2 мкм. Скорость ионообразования q на континентальной поверхности обычно полагается равной ($10^7 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) и около 40% этой проводимости образуется за счет ионизации атмосферных газов радонном. Выражение для плотности тока J_c получено в виде:

$$J_c = \frac{V_i}{R_c} = V_i \left/ \left[\frac{k}{\sigma_c} + V_{FT} \right] \right.$$

Это выражение связывает ток J_c в регионе хорошей погоды с проводимостью приземного слоя атмосферы и показывает, как увеличение проводимости будет приводить к росту плотности тока. Плотность тока J_c постоянна между землей и ионосферой, поэтому изменения J_c , связанные с изменением проводимости у земной поверхности за счет ионизации литосферными газами, будут напрямую передаваться ионосфере. В ионосфере плотность тока проводимости обеспечивается, в основном, электронами, подвижность которых намного выше, чем у ионов. Величина тока J_c на ионосферных высотах связана с электронной концентрацией (n_e) и скоростью дрейфа электронов (v) следующим соотношением:

$$J_c = n_e v e$$

Авторы [28] полагают, что в ночных условиях, когда отсутствует фотоионизация, электронная концентрация на высотах 70-80 км равна примерно $n_e \sim 1 \times 10^7 \text{ м}^{-3}$. Принимая плотность тока $J_c = 2 \text{ pA м}^{-2}$, авторы получают, что $v = 4.5$

км/час. В таком случае, изменение величины тока на 20% приведет через 12 часов к разности высоты возмущенной и невозмущенной областей ионосферы примерно на 10 км. Такие изменения высоты могут быть зафиксированы соответствующей мониторинговой аппаратурой. Если положение нижней границы ионосферы изменится, условия распространения радиоволн в волноводе земля-ионосфера также изменятся, поскольку частота обрезания (f_c), связана соотношением:

$$f_c = c / 2h$$

где h – эффективная высота, c – скорость света. Расчеты [28] показали, что изменение высоты h на 10 км за 12 часов приведет к изменению f_c на 13%, что полностью может объяснить результат, полученный спутником ДЕМЕТЕР [29] и совпадает с величиной изменения f_c , приведенной ранее в работе [30].

Таким образом, по результатам многочисленных спутниковых измерений, и пока что немногочисленных модельных расчетов сформировалось мнение, что в период подготовки землетрясения (за несколько часов, а иногда несколько суток) модифицируется электромагнитное и плазменное состояние магнитной силовой трубки, погруженной в одном полушарии - в зону подготовки очага землетрясения, а в другом полушарии - в магнитосопряженную зону. В качестве претендента на физический механизм передачи электромагнитного возмущения из очага подготовки землетрясения в верхние геосферы рассматривают глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) – вертикальный токовый контур, пронизывающий и электродинамически связывающий все геосферы.

2. О влиянии космической погоды на литосферные процессы

В настоящее время глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) рассматривают не только в качестве претендента на механизм литосферно-ионосферных связей, но и в качестве претендента на более общий механизм - солнечно-земных связей [31, 32]. Как обсуждалось в предыдущем разделе, эффективность функционирования ГЭЦ зависит от активности грозových генераторов (частоты молний) и также от электрической проводимости (сопротивления) цепи, где самую большую проблему представляет слой непроводящего воздуха от земной поверхности до высот средней атмосферы, за ионизацию которого отвечают галактические космические лучи. В настоящее время получены свидетельства обратной связи между грозовой активностью атмосферы и солнечной активностью [33]. Проводимость отдельных участков ГЭЦ также может быть в обратной связи с

солнечной активностью, так как ионизация атмосферного воздуха примерно на 20% обусловлена галактическими космическими лучами, которые находятся в противофазе с солнечной активностью. На основании этих знаний, можно выдвинуть гипотезу 1:

Сейсмическая активность Земли, если она связана с функционированием ГЭЦ, как обсуждалось выше, может изменяться в противофазе с изменениями солнечной активности.

В настоящее время эту гипотезу легко проверить, проанализировав данные о землетрясениях в глобальном сейсмологическом каталоге, издаваемом в Национальном Центре Информации о Землетрясениях (NEIC) Национальной Геологической Службы США (USGS) [34], и данные о солнечной активности (числа солнечных пятен), доступные на сайте [35]. Результат сопоставительного анализа среднегодовых чисел солнечных пятен и годового числа землетрясений с магнитудой 4.5 и более, произошедших на планете в 1973-2010гг приведен на рисунке 4.

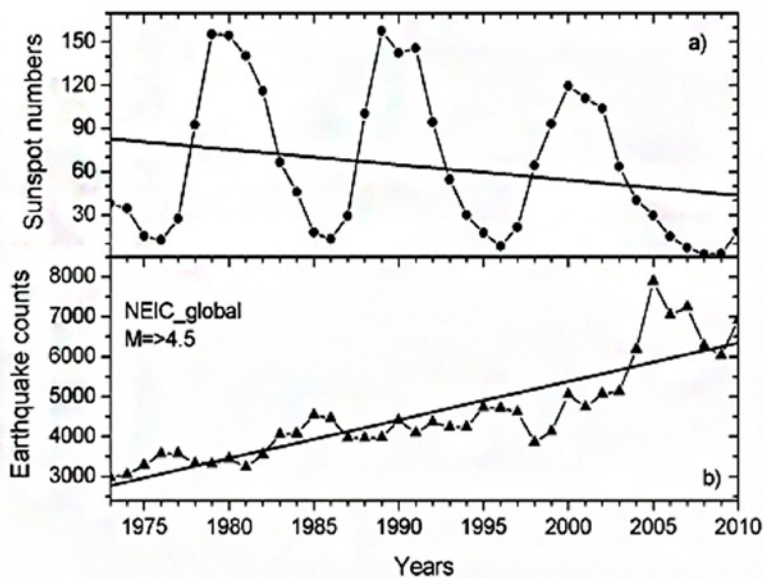


Рисунок 4 – (а): среднегодовые числа солнечных пятен за период с 1973 по 2010гг по данным [35]; (б): годовое количество землетрясений с $M \geq 4.5$, произошедших на планете по данным [34]; сплошные линии –долговременные линейные тренды.

Из рисунка 4 видно, что долговременный тренд солнечной активности и долговременный тренд сейсмической активности находятся в противофазе (черные линии). Что касается связи сейсмичности с 11-летними вариациями числа солнечных пятен, то на рисунке 4 можно заметить, что в годы солнечных минимумов число землетрясений имеет тенденцию несколько возрастать относительно соседних лет, что также поддерживает заключение о противофазных изменениях солнечной и сейсмической активности. Аналогичные результаты получены и в других работах на эту тему [36 - 40]. Таким образом, длиннопериодные тренды в солнечной и сейсмической активности, а также короткопериодные (11-летние вариации) находятся в противофазе. Этот результат поддерживает косвенно предположению о связи сейсмичности с ГЭЦ, эффективность работы которой находится в прямой зависимости от интенсивности потока галактических космических лучей, которые, в свою очередь, находятся в обратной зависимости от уровня солнечной активности.

В рамках современной концепции ГЭЦ ожидается, что электродинамические возмущения на высотах магнитопаузы, обусловленные вариациями космической погоды (энергией солнечного ветра), могут распространяться в нижележащие геосферы вдоль геомагнитных силовых линий (продольные токи) [41]. Поскольку каждая магнитная силовая линия погружена в литосферу в двух магнитосопряженных точках, можно выдвинуть гипотезу 2:

Структурные нарушения литосферы, если они связаны с воздействием космической погоды, могут быть магнитосопряженными.

Уже на первом шаге проверки этой гипотезы было обнаружено [42], что спрединговая граница Антарктической литосферной плиты в южном полушарии находится в геомагнитной сопряженности с зоной сочленения орогенных и платформенных структур в северном полушарии и очень тесная магнитная сопряженность наблюдается между южной границей литосферной плиты Нацка и северными границами плит Кокос и Карибская (рисунок 5).

Таким образом, геомагнитная сопряженность отдельных современных сейсмотектонических структур действительно имеет место, хотя этот факт пока не обсуждается специалистами по физике твердой земли.

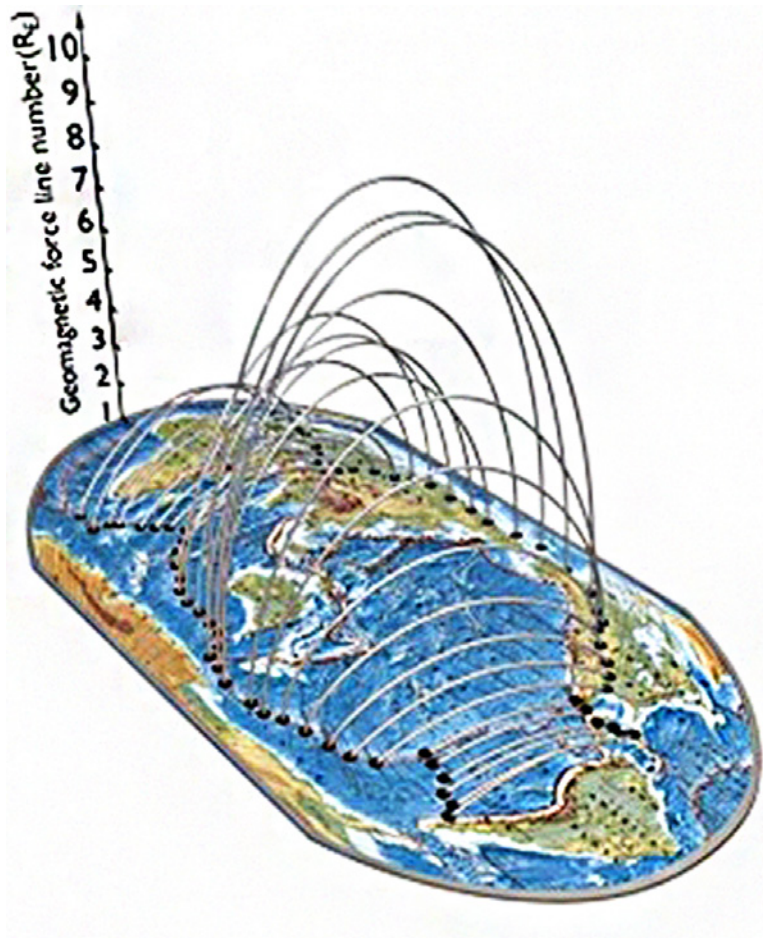


Рисунок 5. – Геомагнитная сопряженность между срединно-океаническим хребтом южного полушария вдоль границы Антарктической литосферной плиты и зоной сочленения континентальных орогенов и платформ в северном полушарии [42].

Проводимость геомагнитной силовой линии зависит от степени ее заселенности заряженными частицами. Согласно современным знаниям [43-46], геомагнитные силовые линии с номером $L \sim 2.0$ заселены аномальной компонентой космических лучей (АКЛ), которая обязана своим происхождением низкоэнергичным атомам межзвездной материи, проникающей в гелиосферу, где эти атомы ионизируются либо за счет солнечного ультрафиолетового излучения, либо за счет соударения с ионами солнечного ветра [45], а затем, при приближении к Земле, захватываются геомагнитной оболочкой с $L \sim 2.0$ [43, 44]. Интенсивность

потока АКЛ модулируется 11 летними вариациями солнечной активности [46], на основании чего можно выдвинуть гипотезу 3: в сейсмоактивных районах, пронизанных геомагнитными силовыми линиями с $L \sim 2.0$, периодичность возникновения землетрясений может быть промодулирована 11 летними вариациями солнечной активности.

Проверка этой гипотезы в работе [47] показала (рисунки 6, 7), что за период с 1973г по 2010гг в районах погружения в земную кору геомагнитных силовых линий $L \sim 2.0$ (желтые линии на рисунке 6) произошло 20 землетрясений с магнитудой 7.0 и выше (красные круги на рисунке 6 с указанием года события). Сопоставление дат этих землетрясений с кривой изменения уровня солнечной активности (числа солнечных пятен) показало (рисунок 7), что землетрясения происходили только на ветви спада солнечной активности, но не происходили на ветви подъема.

Таким образом, в сейсмоактивных районах планеты, пронизанных геомагнитными силовыми линиями с $L \sim 2.0$, которые заселены аномальной компонентой космических лучей, периодичность возникновения землетрясений действительно модулируется 11 летними вариациями солнечной активности.

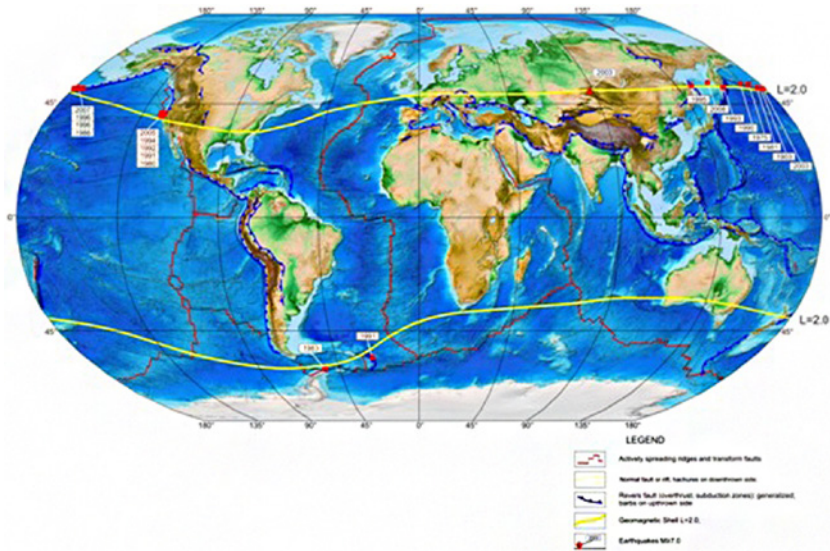


Рисунок 6 – Красные круги – эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$ в районах, с геомагнитными силовыми линиями $L = 2.0-2.2$; желтые кривые указывают линии погружения в земную кору геомагнитных силовых линий с $L=2.0$ [47].

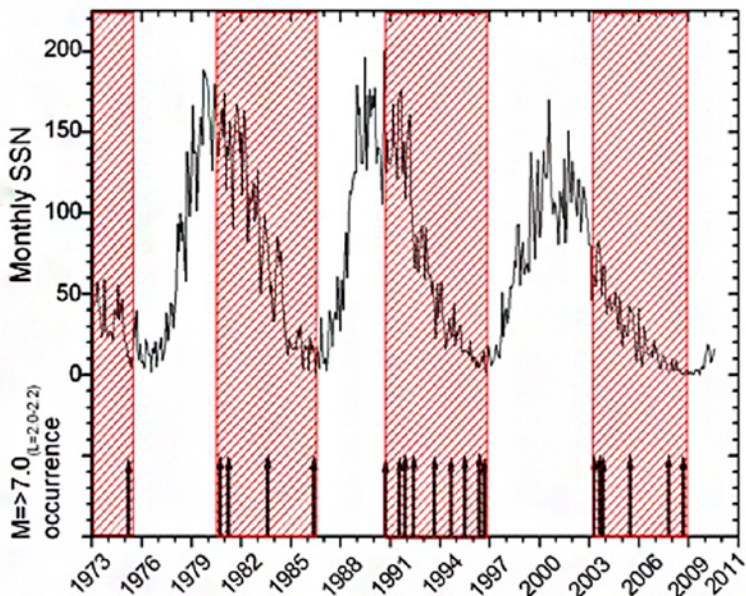


Рисунок 7 –Вариации среднемесячных чисел солнечных пятен в 1973-2011гг (черная кривая), черные вертикальные стрелки маркируют даты землетрясений с $M \geq 7.0$, произошедших в регионах с геомагнитными силовыми линиями $L=2.0-2.2$ [47].

3. Выводы и рекомендации

Термин литокосмическая погода возник на стыке двух научных направлений: космической погоды, характеризующий изменения на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере Земли, и литосферной погоды – непрерывной сейсмической деятельности земной коры и верхней мантии.

Наземные и спутниковые измерения электродинамических и плазменных характеристик околоземного космического пространства показывают, что космическая погода, в частности, состояние ионосферы, магнитосферы, радиационных поясов, изменяется после сейсмического толчка, и в настоящее время практически не существует сомнения, что причина этому – распространение вверх энергии акустико-гравитационных волн, обусловленных движениями земной коры. Одновременно с этим обнаруживается, что космическая погода в верхних геосферах может изменяться и накануне землетрясения – за несколько суток или часов до сейсмического толчка. Важность этого экспериментального факта неоспорима, так как указывает на возможность прогноза землетрясений. Однако физический механизм «предчувствия» околоземным космическим

пространством будущего разрушения геологической среды не понятен, строгого научного обоснования космических предвестников землетрясений не существует, и потому эти факты, хотя и представляют большой интерес для научных исследований, практической пользы пока не приносят.

Уже более 30 лет разрабатываются теоретические подходы для объяснения эффектов литосферно-ионосферно-магнитосферных связей и одна из последних идей предполагает, что землетрясение является элементом глобальной электрической цепи (ГЭЦ) – вертикального токового контура, электродинамически связывающего все геосферы. В рамках концепции ГЭЦ, термин «литокосмическая погода» находит органично свою нишу, поскольку в электрической цепи по определению изменения на ее разных участках взаимосвязаны. Это предполагает, что в конкретном вертикальном контуре ГЭЦ, электродинамические изменения на нижнем участке (в литосфере в период подготовки землетрясения) могут отражаться на характеристиках верхних участков цепи (ионосфере, магнитосфере, радиационном поясе), а электродинамические изменения на верхнем участке цепи (магнитопаузе, управляемой энергией солнечного ветра) могут отражаться на состоянии литосферы.

Первое предположение – о возможности распространения электродинамического возмущения из литосферы вверх, подтверждается спутниковыми измерениями, по результатам которых сделано заключение, что в период подготовки землетрясения возмущено электромагнитное и плазменное состояние по всей длине магнитной силовой трубки, погруженной в район будущего очага (рисунок 1). Также, оно подтверждается модельными расчетами (рисунок 3) которые позволили объяснить один из результатов спутника ДЕМЕТЕР – понижение интенсивности естественного радиоизлучения в диапазоне частот 1.6–1.8 кГц накануне коровых землетрясений с магнитудой 5.0 и выше. Исходя из факта, что магнитные силовые трубки (геомагнитные силовые линии) погружены в земную кору разных регионов под разными углами (рисунок 5), и принимая во внимание, что главный максимум ионосферы, где в основном проявляются эффекты литосферной погоды (рисунок 1), расположен на высотах порядка 300-350 км, можно рекомендовать: для мониторинга ионосферных предвестников землетрясений наземной ионосферной станцией, последняя должна быть установлена на определенном расстоянии южнее (севернее) очага подготовки землетрясения в северном (южном) полушариях. Предварительные оценки для Северного Тянь-Шаня показывают, что для мониторинга ионосферных

предвестников из возможного очага, расположенного в районе произошедших ранее Верненского и Кеминского землетрясений, ионозонд должен быть установлен на территории соседней Кыргызской Республики.

Относительно второго предположения – возможности влияния космической погоды на литосферные процессы, следует заключить, что экспериментальные данные говорят в пользу такой возможности. Так, уровень сейсмической активности планеты изменяется в противофазе с уровнем солнечной активности (рисунок 4), а в сейсмически активных районах, расположенных вблизи зон погружения в земную кору геомагнитной силовой трубки с $L \sim 2.0$, заселенной аномальной компонентой космических лучей, сильные землетрясения ($M \geq 7.0$) имеют тенденцию возникать на ветви спада солнечной активности в 11-летнем солнечном цикле и отсутствовать на ветви подъема (рисунки 6,7). Теоретического объяснения этим эффектам пока не существует. Предполагается, что эти эффекты также могут быть объяснены в рамках современной концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ), эффективность работы которой зависит от интенсивности потока космических лучей, который, в свою очередь, модулируется вариациями солнечной активности. Очевидно, необходимы дополнительные исследования этого вопроса, и в этой связи, можно рекомендовать: проанализировать детально поведение Солнца, солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, космических лучей, магнитного поля Земли накануне и в момент возникновения сильных землетрясений, представленных на рисунке 6, с целью идентификации гелиокосмических факторов, сопутствующих каждому из этих событий.

Литература

1. National Space Weather Program. Strategic Plan. // Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. – August. - 1995. <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/pdf/NSWP-SP-1995-scan.pdf>
2. Жантаев Ж.Ш., Жумабаев Б.Т., Дробжев В.И., Крякунова О.Н., Антонова В.П., Ляхов В.В., Сомсиков В.М., Гордиенко Г.И., Яковец А.Ф. Исследование космической погоды в Казахстане//Физика окружающей среды. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. г. Томск. – 2011. – С. 22-25.
3. Pulinets, S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. // Springer, Berlin, New York. –2004. – 316 p.
4. Nemes F., O. Santolik, and M. Parrot. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study//J. geophys.

Res. –2009. –114. –A04303. doi:10.1029/2008JA0113972.

5. *Yumoto K., Ikemoto S., Cardinal M.G., Hayakawa M., Hattori K., Liu J.Y., Saroso S., Ruhimat M., Husni M., Widarto D., Ramos E., McNamara D., Otadoy R.E., Yumul G. Eborar., Servando N.* A new ULF wave analysis for Seismo-Electromagnetics using CPMN/MAGDAS data // *Physics and Chemistry of the Earth.* –2009. – Vol. 34, № 6-7. – P. 360-366.

6. Selected Papers of MAGDAS for ISWI / MAGDAS School on Litho-Space Weather <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/news/MAGDASSchool2011>.

7. *Davies K., and Baker D.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaska earthquake of March// *J. Geophys. Res.* – 1964. –70 (9). – P. 2251-2253.

8. *Альперович Л.С., Гохберг М.Б., Дробжжев В.И., и др.* Проект МАССА — исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях // *Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли».* – 1985. – № 11. – С. 5-8.

9. *Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А., Пармасарати С.* Акустическое возмущение от подземного ядерного взрыва как источник электростатической турбулентности в магнитосфере.// *Докл. АН СССР.* – 1990. – 313, (3). – P. 568-574.

10. *Pulinets S.A., P. Biagi, V. Tramutoli, A. D. Legen'ka, V.Kh. Depuev.* Irpinia earthquake 23 November 1980 – Lesson from Nature reviled by joint data analysis// *Annals of Geophysics.* – 2007. – Vol. 50, № 1. – P. 61-78].

11. *Захаренкова И.Е., Шагимуратов И.И., Лаговский А.Ф., Кранковски А.* Исследование ионосферных предвестников для землетрясений класса М~5.0 // *Электронный журнал «Исследовано в России».* –2006, № 39. –С.361-371. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/039.pdf>

12. *Ruzhin Yu.Ya., Larkina V.A., Depueva A. Kh.* Earthquake precursors in magnetically conjugated ionosphere regions // *Advances in Space Research.* –1998. –Vol.2. –P. 525-528.

13. *Ruzhin Yu.Ya., Shagimuratov I.I., Kunitsyn V.E., Depueva A.Kh., Razinkov O.G.* GPS based tomographic reconstruction of the ionosphere // *Advances Space Research.* –1998. –Vol. 21, № 3. –P. 521-524.

14. *Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G.A.* Observation by space – borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over on earthquake center// *Phys. Earth Planet. Inter.* –1989. –Vol.57. –P. 110-114.

15. *Pulinets S.A.* Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults //References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article//*Advances in Space Research.* –2009. –Vol.44. –P.767-773.

16. *Wilson C.T.R.,* Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms// *Phil.Trans. Roy. Soc.* –1920. –A 221. –P. 73-115.

17. *Roble R.G., Tzur I.* The global atmospheric electrical circuit// *In Study in Geophysics-The Earth's electrical Environment.* National Academy Press. Washington, D. C. –1986. –P. 206-231.

18. *Bering E.A., Few A.A., Benbrook J.R.* The Global Electric Circuit//*Physics Today.* –1998, October. –P. 24-30.

19. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. –2008. № 10. – С. 8-18.
20. Makarova L.N., Shirochkov A.V. A new approach to the global electric circuit conception. –1998. <http://www.sgo.fi/SPECIAL/Contributions/Makarova.pdf>.
21. Pulinets S.A. Natural radioactivity, Earthquakes, and the Ionosphere//EOS, Transactions, AGU. –2007. – Vol. 88, № 20. –P.217-218.
22. Khilyuk L.F., Chillingier G.V., Robertson J.O., Endres B. Gas Migration// Events Preceding Earthquakes, Houston, Texas. Gulf Publishing Company. 2000–390 p.
23. Heincke J., Koch U., Martinelli G. CO₂ and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research// Geophys. Res. Lett. –1995. –Vol.22. –P.774 -779.
24. Pulinets S.A., Alekseev V.A., Legen'ka A.D., Hegai V.V. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification // Adv. Space Res. –1997. –Vol. 20, № 11. –P. 2173–2176..
25. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity//Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. –2005.№ 67. –P.1259-1268.
26. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity. Natural Hazards and Earth System //Sciences. –2007. –Vol.7. –P.155-163.
27. Markson, R. Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun-weather relationship//Nature. –1978. –Vol.273. – P. 103-109.
28. Harrison R.G., Aplin K., Rycroft M. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. –2010. № 72 (5-6). –P.376-381.
29. Ne'mec F., Santolik O., Parrot M. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study // J. geophys. Res. –2009. –№ 114. – A04303. doi:10.1029/2008JA0113972.
30. Pulinets S., Seismic activity as a source of the ionospheric variability// Adv. Space Res. –1998. –Vol. 22, № 6. –P. 903-906.
31. Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change// Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. –2000. –Vol. 62. – P.1563-1576.
32. Harrison R.G. The global atmospheric electrical circuit and climate//Survey in geophysics. – 2004. –Vol. 25. –P.441-484.
33. Каримов, П. П. Солнечные и космофизические факторы в динамике грозовой активности//Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Якутск. –2002. –28с.
34. <http://earthquake.usgs.gov/neic.world.epic>.
35. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html>.
36. Узбеков Н.Б., Хачикян Г.Я. 11-летние вариации солнечной активности и сейсмичности Земли // Журнал проблем эволюции открытых систем. –2006. –Т2. – С.52-55.

37. *Хачикян Г.Я., Джанабилова С.О., Оралов Ж.Н., Рыскулов К.А.* Гелио-геомагнитный контроль пространственно-временных вариаций сейсмичности Земли // Сборник докладов 7-го Казахстанско-Китайского международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска центральной Азии». - Алматы. –2010. –С. 267-271.

38. *Рогожин Ю.А., И.П.Шестопалов.* Вековые циклы сейсмичности Земли и сейсмическая безопасность АЭС//Атомная стратегия. –2007. –№29. <http://www.proatom.ru/modules.php>.

39. *Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П.* Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. –1998. –№.7. – С. 85–90.

40. *Шестопалов И.П., Харин Е.П.* О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью//Сборник докладов III Международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», Петропавловск-Камчатский. –2004. – www.gcras.ru/publications/Kharin.pdf

41. *Ohtani, Shin-ichi; Ryoichi Fujii, Michael Hesse, Robert Lysak* Magnetospheric Currents Systems//Am. Geophys. Union, Washington, D.C.–2000. –ISBN 0-87590-976-0.

42. *Khachikyan G.Ya., Zhakupov N.S., Kadyrkhanova N.Zh.* Additional evidence that earthquake is element of global electric circuit//Book of Abstract, European Seismological Commission 33rd General Assembly. - Moscow. 19-24 August 2012. –P. 84.

43. *Galper M.A.* Earth radiation belt//Soros Educational Journal. –1999. № 6. www.eduhmao.ru/var/db/files/3456.9906_075.pdf.

44. *Garcia-Munoz, M., Mason, G.M., Simpson, J.H.* A new test for solar modulation theory: the 1972 May-July galactic cosmic ray proton and helium spectra // Astrophys. J. Lett. – 1973. – Vol.82. – P. 81-84.

45. *Fisk, L.A., Kozlovskiy, B., Ramaty, R.* (1974). An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancement in low energy cosmic rays// Astrophys. J. Lett. –1974. № 190. –P. L35-L38.

46. *Christian, Eric R.* Evidence for anomalous cosmic ray hydrogen. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology. –1989. - <http://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-05302007-091830>.

47. *Khachikjan G., Inchin A., Zhakupov N., Kadyrkhanova N., Kaliyeva L.*

Occurrence of strong earthquakes in regions with geomagnetic shell $L \sim 2.0$: relation to 11 year solar cycle. Proceedings of the 7-th Kazakhstan-Chinese International Symposium “Earthquake Prediction Seismic Hazard and Seismic Risk Assessment in Central Asia”. Almaty. –2010. –P.357-362.

ОБСЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИИ
НА ПРИМЕРЕ ЖЕЗДИНСКОГО, ШОКАЙСКОГО И
АЩИСУЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

Бреусов Н.Г., Шигаев Д.Т., Асанкулов Н.А., Ахметтаев Е.М., Сатыбалдиев Д.С.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В данной работе приведены результаты обследования, изыскания гидротехнических сооружений Центрального Казахстана. Георадарное зондирование водохранилищ позволило выявить аномальные зоны, зоны повышенной влажности в теле плотины. Зафиксированы границы зоны распределения, при которых в грунтах происходит перераспределение напряженного состояния, приводящее к развитию трещин разрыва в поперечном направлении относительно продольной оси дамбы.

Область применения результатов: защита гидротехнических сооружений,

Ключевые слова: ГЕОРАДАР, РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, АНОМАЛЬНЫЕ ЗОНЫ ВОДОХРАНИЛИЩ, РАЗРУШЕНИЕ.

Мақалада геометриялық модельдеу әдісі көрсетілген. Бұл әдіс эмпирикалық деректердің үлестіру заңдылықтарды көрнекті әдіспен елістіруге мүмкіншілік береді.

Нәтижелердің қолдану облысы - Жер зерттеу ғылымы, геофизика

Түйінді сөздер - ГЕОФИЗИКА КЕРІ ЕСЕПТЕРІ, ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ
МОДЕЛЬДЕУ

This paper presents the results of a survey research waterworks Central Kazakhstan. Georadar sensing reservoirs revealed anomalous zones, areas of high humidity in the dam body. The boundary of the distribution, in which soil is a redistribution of the stress state, leading to the development of cracks gap in the transverse direction relative to the longitudinal axis of the dam are fixed.

The area of application of the results: the protection of hydraulic structures.

Keywords: GPR RADAR IMAGING, THE ABNORMAL AREA RESERVOIRS,
DESTRUCTION

В данной работе приведены результаты исследования гидротехнических сооружений Центрального Казахстана с использованием георадарного зондирования, обработки и интерпретация полученных результатов. Необходимость изучения свойств основания плотины, разработка методов контроля и прогноза физического состояния водохранилищ, вызвано многолетним использованием водохранилищ, что приводит к возможным аварийным ситуациям, наносящим экологический и экономический ущерб и представляющим опасность для жизни людей. В связи с этим социальные последствия и материальный ущерб от их повреждения или разрушений, главным образом за счет воздействия волны прорыва, более значительны, чем при авариях других инженерных сооружений. Человеческие жертвы и материальный ущерб при авариях современных плотин сопоставимы с последствиями природных катаклизмов. Одной из основных причин разрушения плотин, часто является невыполнение своевременно ремонтно-восстановительных работ [1].

Георадарное обследование на исследуемых водохранилищах выполнялась методом профильного зондирования с помощью георадара ОКО-2 АБ 400. Георадарное исследование решает множество задач:

- 1) расположение грунтов с различной плотностью;
- 2) определение пустот в обследуемом сооружении;
- 3) определение толщины отдельных слоев грунта и границ между различными участками;
- 4) определение свойств и структур различных отложений.

Принцип действия аппаратуры поверхностного радиолокационного зондирования (в обще принятой терминологии – георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондированной среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами – уровень грунтовых вод, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и осадочными породами и т.д. Помимо грунтов, георадиолокационное обследование проводится на несущих конструкциях здания и позволяет определить их состояние, наличие трещин, пустот и ослабленных

участков элементов конструкций [2].

Объектом обследований были выбраны крупные водохранилища Центрального Казахстана как Жездинское, Шокайское, Ащысуское. Жездинское водохранилище расположено вдоль реки Жезды в Карагандинском области, Улытауском районе на равнине Сарысу. Географическое положение к югу от города Жезказган $47^{\circ}47'$ северной широты и $67^{\circ}42'$ восточной долготы. Площадь 17,6 , длина 11 км, ширина 2,5 км, самое глубокое место 8,0 м, средняя глубина 3 м, объем в среднем 76 млн.м³. Водоёмкость 3580 км². На рисунке 1 показаны профили обследования длиной до 200 м [3].



Рисунок 1 – Продольные профили №001-007 Жездинского водохранилища

В результате обработки и интерпретации результатов зондирования Жездинского водохранилища (рисунок 2), выявлены зоны разуплотнения и зоны повышенной влажности в теле плотины. На георадарном профиле четко проявляются геологические слои и границы разуплотнения в точках от 55 до 60 метров на глубине более трех метров от уровня гребня дамбы. Зафиксирована граница зоны распределения, при которой в грунтах происходит перераспределение напряженного состояния, приводящее к развитию трещин разрыва в поперечном направлении относительно продольной оси дамбы. Местами зафиксирована особо повышенная зона влажности в теле плотины на отметках 33-35, 63-65, 108 и до 175 метров глубиной проницаемости до 2 метров, что может привести к образованию аномальных зон в теле плотины.



Рисунок 2 – Продольный профиль по гребню плотины № 004 по Жездинскому водохранилищу

Шокайское водохранилище построено 1971 году в Карагандинской области, в районе Бухаржырау на севере в 0,5 километре от села Баймурзы, на реке Шокай. Водохранилище используется для орошения земли сельского хозяйства 500га. Объем полностью воды 5 млн, длина 3,6 км ширина 600 м, самое глубокое место 14,8м. На рисунке 3 показан путь профиля обследования, где был проведен только один продольный профиль по гребню плотины длиной 200 м.

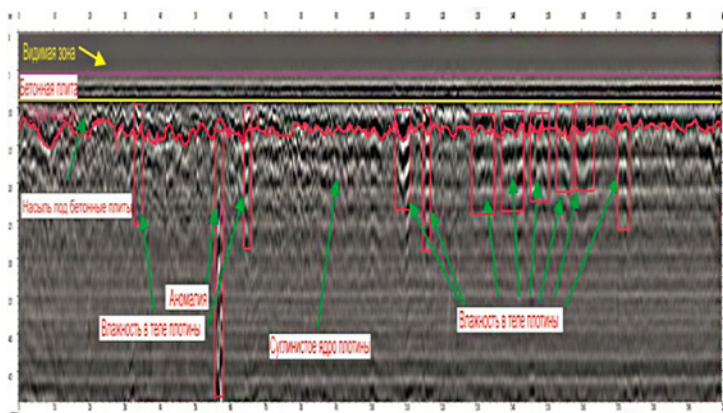


Рисунок – 3 Продольный профиль №001 Шокайского водохранилища

В результате обработки и интерпретации результатов зондирования Шокайского водохранилища (рисунок 4), в насыпной суглинистой плотине выявлены зоны повышенной влажности. На георадарном профиле четко проявляются геологические слои и зоны повышенной влажности в теле плотины глубиной проницаемости до 2 метров на отметках 120-164 метра, что может так же привести к образованию аномальных зон в теле плотины.

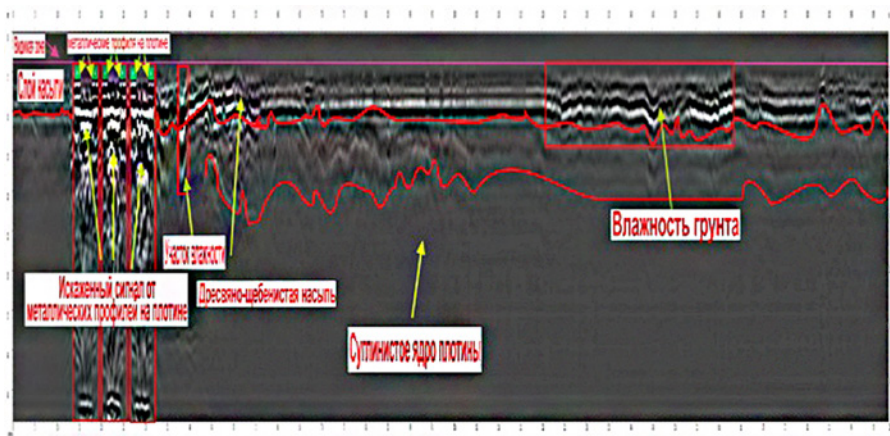


Рисунок 4 - Продольный профиль по гребню плотины №001 по водохранилищу Шокай

Ащыуское водохранилище построено в 1984 году в Карагандинском области в районе Бухаржырау, на 4 км автомобильной дороге Караганды-Каркаралы, вдоль реки Ащысу. Площадь воды 670 га, объем воды заполненное время 20млн, длина 9км, ширина 2 км, самое глубокое место 15м, длина берега 23км. На рисунке 5 показаны профили обследования, 2 из которых являются продольными (профиль № 001,002) по 200 м и 2 поперечными (профиль № 003,004) длиной по 16 м.

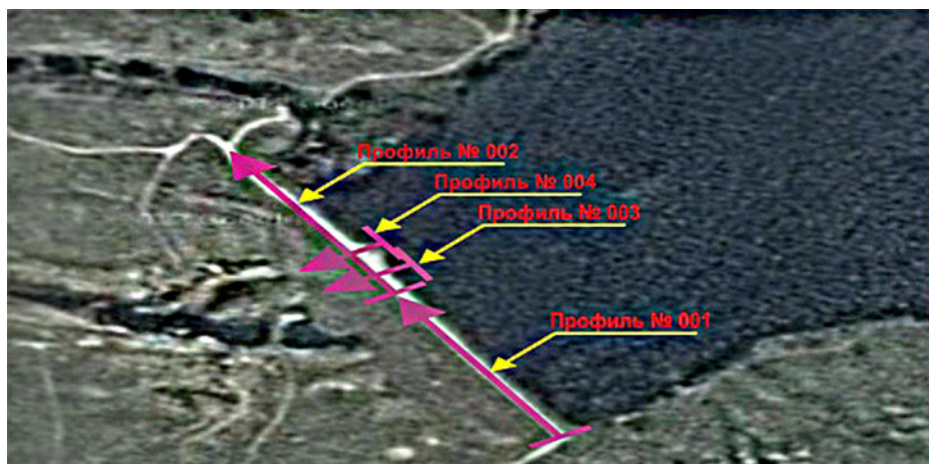


Рисунок 5 – Продольные профили №001-007 водохранилища Ащысу

В результате обработки и интерпретации результатов зондирования Ащисуйского водохранилища (рисунок 6), выявлены зоны повышенной влажности. На георадарном профиле четко проявляются геологические слои и зоны повышенной влажности в теле плотины глубиной проницаемости до 2 метров на отметках 68-70 метра, что может так же привести к образованию аномальных зон в теле плотины. Проведение георадарного обследования позволило обеспечить высокую точность обследования: обнаружить внутренние трещины конструкции сооружения и ее деформации, места расположения зон разуплотнения грунтов и их пустот, толщины конструктивных слоев. Полученные результаты подтверждают предположение фильтрационных процессов и вымывания песчано-гравелистого грунта с суглинистым экраном и диафрагмой из глинистой стенки в местах расположения аномальных зон и суффозионный вынос грунта из основания плотины в результате гидродинамического воздействия при циклическом наполнении и опорожнении водохранилища [4].

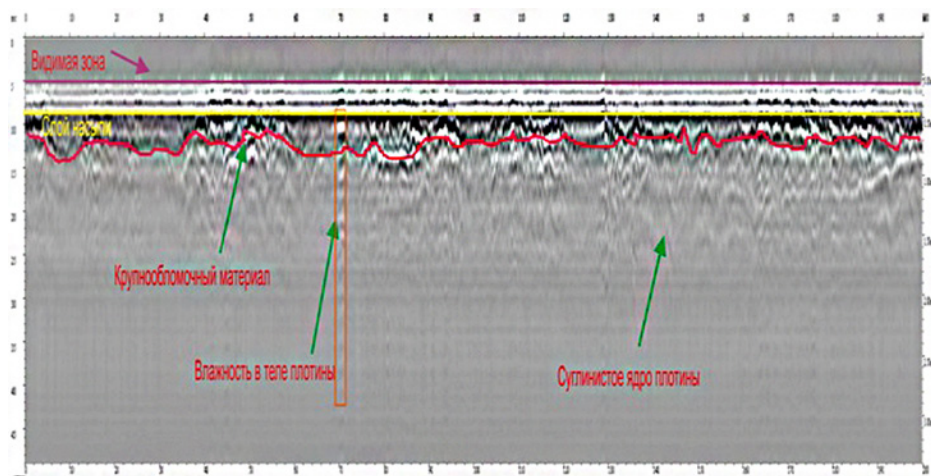


Рисунок 6 – Продольный профиль по гребню плотины № 001 по водохранилищу Ащису

В целях устранения развития фильтрационных процессов и вымывания песчано-гравелистого грунта с суглинистым экраном и диафрагмой из глинистой стенки в местах расположения аномальных зон, рекомендуется производство пригрузки (обваловки) откосов плотины из суглинистых материалов. Пригрузку следует выполнять по всей площади откосов в пределах 5 погонных метров в обе стороны от центра неоднородности по оси плотины.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Научные основы наземно–космических методов прогноза вторичных сейсмообусловленных процессов»

Литература

1. *Саламов А.М., Габиров Ф.Г.* Изучение оползневых процессов на Баилловском склоне в г. Баку методом вертикального электрического зондирования // Инженерные изыскания. – 2010 – №11. – С. 36-41.
2. *Белозеров А.А., Кулижников А.М.* Применение георадаров для обследования оползневых участков автомобильных дорог // Георадары-дороги–2002. Материалы Международной научно-практической конференции АГТУ, г. Архангельск. –2002. –С. 67-73.
3. *Колосов М.А., Моргунов К.П., Коган Г.В.* Использование георадарных методов исследования грунтов оснований камеры шлюза // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009 – № 4. – С. 29-33.
4. *Бандурин М.А.* Обследование состояния оросительных лотковых каналов азовской оросительной системы неразрушающими методами // Научный журнал КубГАУ. –2006. № 24(8).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ В НЕФТЕГАЗОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ КАЗАХСТАНА

Передеро В.С., Виляев А.В., Бибосынов А.Ж., Серикбаева Э.Б.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Представлены результаты сравнительного анализа аномального теплового поля с параметрами геодинамической активности. Показано, что технология дистанционного наблюдения за тепловым полем активных регионов имеет определенные перспективы, а разработанная методика может быть использована при геологическом картировании и прогнозе нефтяных месторождений.

Область применения результатов: науки о Земле, космический мониторинг районов добычи углеводородов.

Ключевые слова: ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, НЕФТЕГАЗОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Аномалды жылулық өрістің геодинамикалық белсенді параметрлермен салыстырмалы талдау нәтижелері көрсетілген. Белсенді аймақтардың жылулық өрісін ара-қашықтықтан зодылау арқылы бақылау технологиясында геологиялық карталандыруда және мұнай-газ кен орындарын болжауда келешегі үлкен екені көрсетілген.

Нәтижелерді қолдану аймағы: Жер жайлы ғылым, көмірсутекті барлау аймақтарында аймақтық ғарыштық бақылау.

Негізгі сөздер: АРА-ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДЫЛАУ, МҰНАЙ-ГАЗ КЕШЕНІ.

The results of the comparative analysis between the anomalous thermal field and parameters of geodynamic activity are presented. It is shown that the technology of remote monitoring of the thermal field of active regions has some perspectives, and the developed method can be used in geological mapping and prediction of oil fields.

The area of application of the results: earth sciences, space monitoring areas of hydrocarbon production.

Keywords: EARTH REMOTE SENSING, OIL AND GAS COMPLEXES

Введение

В современных условиях успешность поисковых геологоразведочных работ во многом зависит от применения новых технологий, среди которых важную роль играют методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Практический интерес представляет изучение распределения теплового поля территории Казахстана, характеризующейся интересными геологическими и геофизическими особенностями (региональная нефтегазоносность, наличие богатого и разнообразного комплекса твердых полезных ископаемых, весьма сложные по строению и различные по возрасту консолидации структуры земной коры, интенсивные новейшие тектонические и современные тектонические движения). В целом, изучение термического поля необходимо при решении кардинальных вопросов геологии (глобальная эволюция Земли, геотектонические теории и др.). Карты тепловых полей имеет многоплановое применение для решения многих вопросов геологии, геофизики, сельского хозяйства, состояния поверхностных вод, ледников, проявления техногенной деятельности. Решение этих проблем требует определенного подхода к анализу исходных материалов тепловых съемок.

1. Физические основы использования инфракрасной съемки

Тепловые каналы спутников (TERRA, AQUA (MODIS), ASTER, Landsat-7) несут информацию о распределении внутреннего теплового потока Земли, подвергнутого влиянию имеющихся геологических факторов (разломы, плотность, трещиноватость пород и др.). Температурное поле в большой степени определяет физическое состояние материала литосферы Земли, а соответственно и параметры геофизических полей, и развитие геодинамических процессов. Знание характеристик температурного поля существенно облегчает решение тектонических и петрологических проблем, помогает при интерпретации других геофизических полей (особенно электромагнитных), позволяет оценить энергетическое состояние литосферы.

Основной термической характеристикой литосферы является тепловой поток который определяется как произведение значений геотермического градиента измеряемого в скважинах, и теплопроводности пород измеряемой обычно в лабораторных условиях.

Тепловое поле поверхности суши определяется внутренними и внешними источниками тепла, тепловыми свойствами горных пород. Факторами формирования региональных и локальных аномалий температур поверхности

суши могут быть:

- эндогенное тепло Земли;
- региональные и локальные условия инсоляции;
- проявления современного вулканизма и тектонических движений;
- многолетнемерзлые породы, т.е. мощные (до сотен метров) толщи пород с отрицательными температурами;
- циркуляция подземных, в том числе термальных вод;
- наличие пород и руд с повышенной радиоактивностью;
- химические и биохимические процессы (экзотермические и эндотермические), происходящие в нефтегазоносных горизонтах, залежах угля, сульфидных и других рудах, почвах, а также антропогенных отложениях.

В соответствии с вышеперечисленными факторами, неоднородность распределения теплового поля может являться индикатором объектов, процессов и явлений имеющих на исследуемой территории [1]. По принятой классификации ИК область спектра условно делится на 4 диапазона: ближний (0.76 - 3.0 мкм); средний (3 - 6 мкм); дальний (6 - 15 мкм) и очень далекий (> 15 мкм). Особый интерес представляет съемка в среднем и дальнем диапазонах ИК области спектра. В указанных диапазонах распространяется собственное излучение объектов земной поверхности, при этом интенсивность ИК излучения обусловлена их тепловым состоянием. Поэтому съемка называется тепловой инфракрасной, что наиболее полно отражает суть метода. Выборка спутниковых данных (продукты MOD021KM и MOD03) производится по заданным критериям. Пространственным критерием является изучаемая геодинамически активная территория Казахстана, временным критерием – время суток, сезон (времена года) и год. На рисунке 1 представлены среднемесячные поля температур поверхности для региона Прикаспия, полученные путем формализованной обработки тепловых снимков спутника MODIS TERRA (31 канал) для ночных сцен.

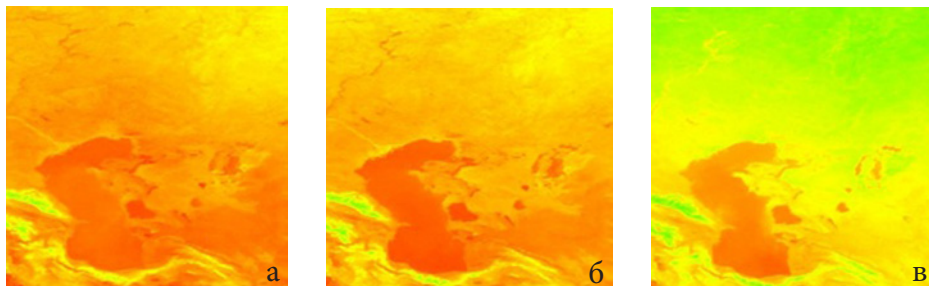


Рисунок 1 – Среднемесячные ночные поля температуры подстилающей поверхности за июль (а), август (б) и сентябрь (в)

2010 года в районе Прикаспия по данным прибора MODIS TERRA

2. Связь геологических и геофизических индикаторов геодинамической активности и поля теплового излучения для Прикаспия

Прикаспийский регион отличается как своим геологическим строением, так и особенностями геодинамического режима. Используя технологию обработки тепловых космических снимков, была сделана попытка выделить аномальное тепловое поле для этого региона и дать качественную оценку его соответствия геодинамическим индикаторам. В качестве исходного взят тепловой ночной снимок спутника TERRA (данные радиометра MODIS 31канал), представленный на рисунке 2. Для геологического картирования разработана специальная методика дешифрирования данных дистанционного зондирования. На исследуемой территории анализировались космические снимки низкого разрешения (MODIS), цифровой рельеф. Известно, что температура земной поверхности зависит от плотности потока суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, альбедо земной поверхности, коэффициента излучения, тепловой инерции, плотности теплового потока из земных недр, влажности почвы, геометрии поверхности и структуры грунта, метеорологических условий, концентрации в атмосфере оптически активных газов (например, CO₂, SO₂) и времени. Поэтому для дистанционного измерения теплового потока необходимо «очистить» исходные результаты тепловой аэрокосмической съемки от влияния других факторов.

Как можно видеть (рисунок 2), на снимке хорошо отображены контуры Каспийского моря, видны многочисленные слики от открытых водоемов. Структуры геологического плана на исходном снимке просматриваются лишь в первом приближении, да и то только те, которые выражены в рельефе. Например, можно отметить выраженные более теплыми тонами структуры в восточном Прикаспии и на юго-западе региона. Однозначно, что такой исходный тепловой снимок несет очень небольшой объем информации о геолого-тектоническом строении этого региона и не может быть использован для выявления распределения геодинамических параметров.

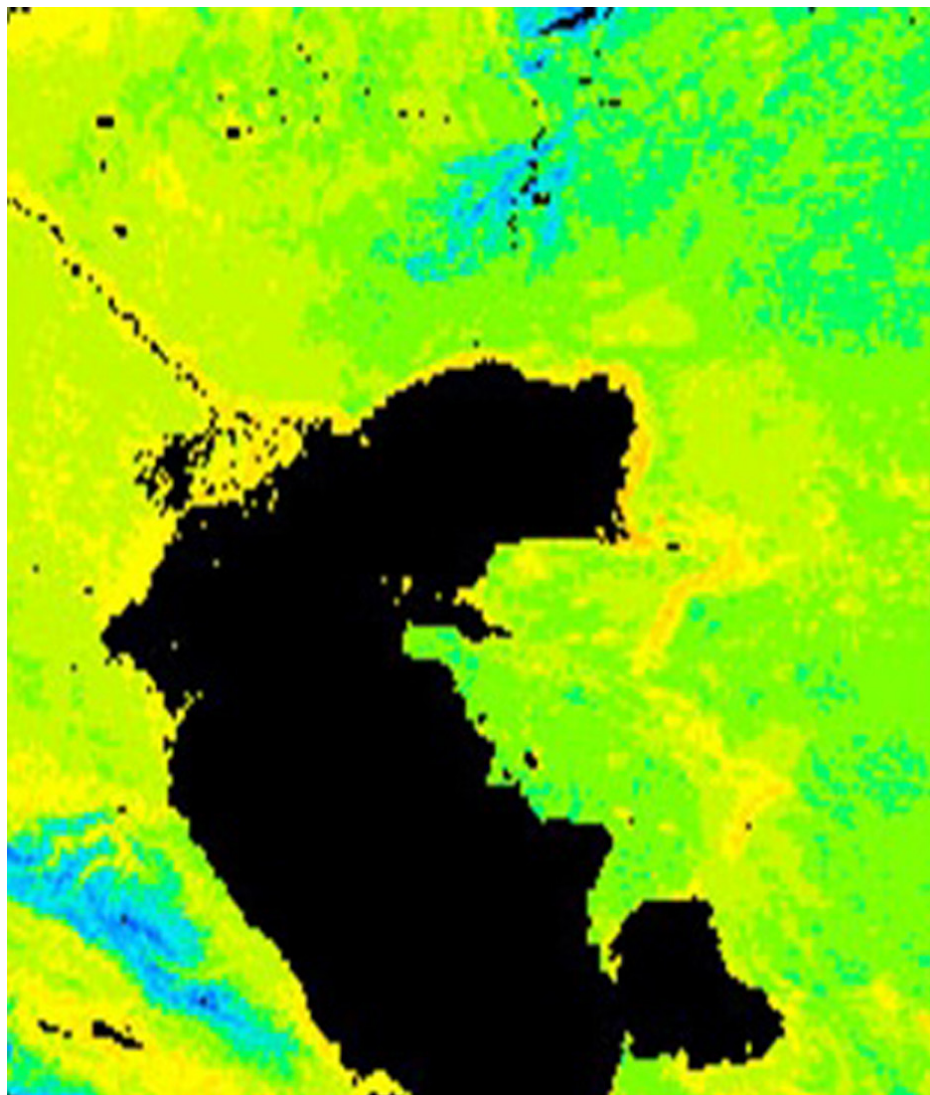


Рисунок 2 – Исходный тепловой снимок Прикаспийского региона

На рисунке 3 представлен региональный фон теплового поля Прикаспийской впадины. В отличие от исходного снимка, аномальное тепловое поле Прикаспия представлено распределением тепловых аномалий точечной и линейной структур различной плотности и направления. Поле имеет гораздо меньшую интенсивность и плотность его распределения.

Осуществив процедуру тематической обработки теплового снимка, получим картину аномального теплового поля, которая представлена на рисунке 4. В задачу дешифрирования входили различного рода операции (фильтрация, классификация, контрастирование, арифметические операции, синтез каналов и др.), позволяющие выделять информативную часть теплового потока. Результаты экспортировались в ГИС в виде слоев пространственно распределенной географически привязанной базы данных (геолого-геофизическая, векторная и тематическая обработка ДДЗ).

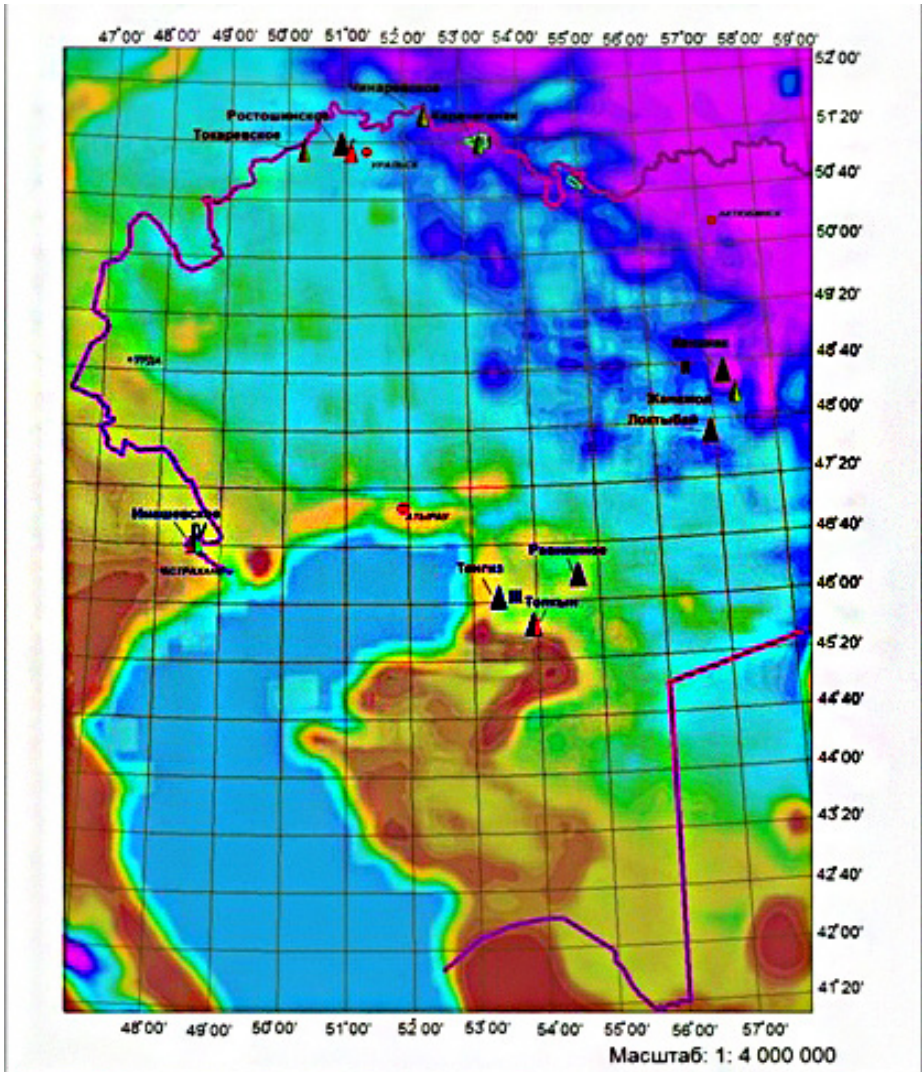


Рисунок 3 – Региональный фон теплового поля Прикаспийской впадины

Данные дистанционного зондирования обработаны специальным программным средством ERDAS IMAGINE и интегрировались в геоинформационную систему в среде ArcMap. Аномалии теплового поля в большей части региона представлены мозаичной структурой, а тепловые аномалии линейной формы наблюдаются только в южной и юго-западной части региона (рисунок 4). Более убедительно выглядит совпадение вытянутых аномалий теплового поля с тектоническими нарушениями в южной части региона. Здесь в тепловом поле хорошо прорисовываются активные тектонические структуры, в пределах которых проявлена сейсмичность (например, зона III на рисунке 4) [2].

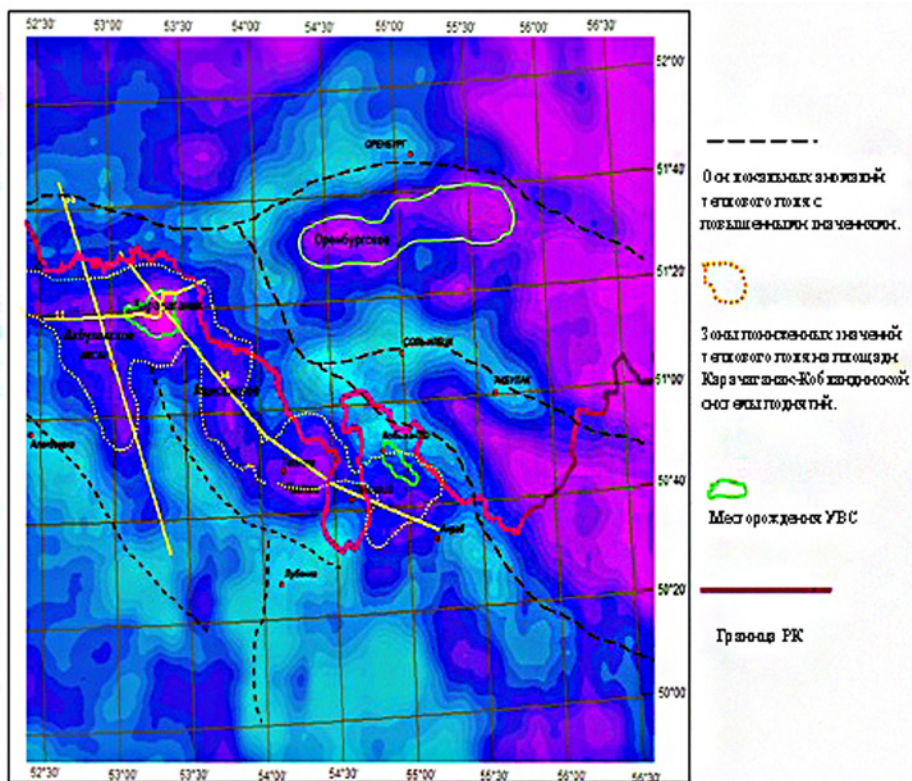


Рисунок 4 – Аномальное тепловое поле Прикаспийского региона

С помощью ДЗЗ Тегга (MODIS), дополненных морфоструктурными построениями, Подколзин В.Ф. разработал метод, который показывает, что существует общая закономерность: ловушки располагаются в пониженном тепловом поле и выражены спектральными аномалиями в видимом ближнем и среднем инфра-

красном диапазоне.

Факторы, способствующие формированию пониженных значений (аномалий) теплового поля:

- повышенная пористость горных пород и их толщина;
- нефтегазонасыщенность горных пород.

Факторы, способствующие формированию повышенных значений (аномалий) теплового поля:

- понижение пористости горных пород и их толщин;
- нарушенность горных пород способствующая повышенному теплообмену (зоны тектонических нарушений).
- соленой диапиризм;
- увеличение влажности и обводненности горных пород;
- физические процессы в горных породах - радиоактивность.

Разработанная методика на примерах известных месторождений нефти показала, что может быть информативной при геологическом картировании и прогнозе нефтяных месторождений.

На рисунке 5 представлены аномалии теплового поля и локальные аномалии гравитационного поля Прикаспийской впадины и части Мангышлак – Устюртского региона, доказывающие возможность использования данных ИК при комплексном решении геологических задач. Зоны пониженных значений теплового поля, как северной бортовой зоны Прикаспийской впадины на участке Карачаганак-Кобландинской системы поднятий, так и пониженные значения теплового поля месторождения Карачаганак, связаны с повышенной пористостью и нефтенасыщенностью горных пород, отличающихся по физическим свойствам от депрессионных отложений. В гравитационном поле месторождения углеводородов приурочены к отрицательным аномалиям силы тяжести.

Резюмируя результаты проведенного сравнительного анализа связи аномального теплового поля с геодинамическими параметрами региона, следует отметить их определенную качественную связь, что указывает на их единую природу. Полученные результаты сравнительного анализа, показавшего определенную качественную связь аномального теплового поля с другими параметрами геодинамической активности свидетельствуют, что технология дистанционного наблюдения за тепловым полем активных регионов имеет определенные перспективы. При этом следует понимать, что аномальное тепловое поле является более динамичным процессом.

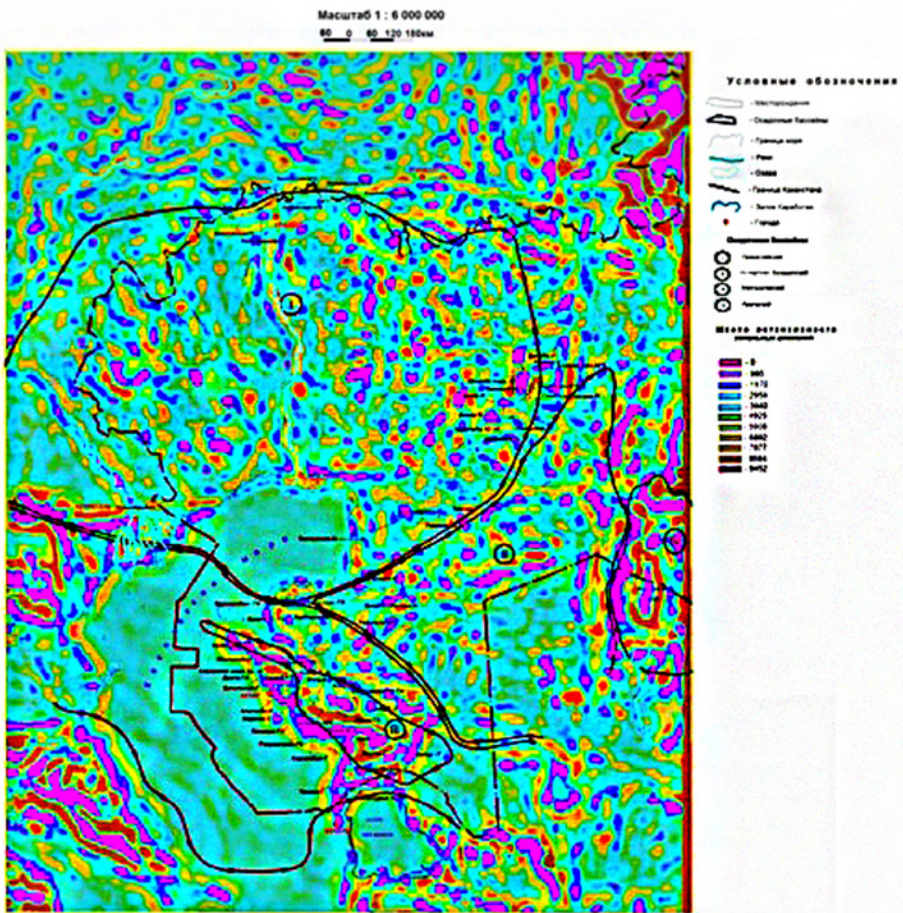


Рисунок 5 – Карта локальных аномалий теплового поля северо-восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины.

Литература

1. Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий//М. Изд-во «Недра». – 1965. –495с.
2. Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А. Принципы комплексирования в разведочной геофизике//М. Изд-во «Недра». –1977. –218 с.

НЕФТЕГАЗОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ УЗЕНЬ КАК НАЗРЕВАЮЩИЙ ОЧАГ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЕЁ РИСКА

Голубов Б.Н.* , Лобковский Л.И.* , Мар Г.Н.* , Турунтаев С.Б.*
Жантаев Ж.Ш., Бреусов Н.Г., Виляев А.В.

Институт Океанологии РАН*
АО Национальный центр космических исследований и технологий
Национальное космическое агентство Республики Казахстан

Рассматриваются основные природные и техногенные факторы активизации сейсмических и деформационных процессов нефтегазового месторождения Узень, от надежности мониторинга и прогноза которых зависят эффективность разработки месторождения, а также защитные мероприятия по предотвращению опасных инженерно-геологических процессов.

Область применения результатов: эксплуатация нефтегазовых месторождений, наземно-космический геодинамический мониторинг

Ключевые слова: НЕФТЕГАЗОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, СЕЙСМИЧНОСТЬ, ФЛЮИДОДИНАМИКА, ТЕХНОГЕННЫЕ ПОДВИЖКИ, СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК, НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

ӨЗЕН МҰНАЙ-ГАЗ КЕН ОРНЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕРДЕН ТУҒАН ЖЕТІЛГЕН ОШАҒЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚАУІПТІЛІГІН ТӨМЕНДЕТУ ЖОЛДАРЫ

Бақылау мен болжаудың жоғарылығынан кен орының өнімділік тиімділігі тауелді болғандықтан, сонымен қатар қауіпті инженерлік-геологиялық үдерістерді болдырмау үшін, мұнай-газ Өзен кен орнының сейсмикалық және деформациялану үдерістерінің негізгі табиғи және техногендік әсерлері қорғау шаралары қарастырылуда.

Нәтижелерді қолдану аймағы: мұнай-газ кен орындарын пайдалану, жергілікті-ғарыштық геодинамикалық бақылау.

Негізгі сөздер: МҰНАЙ-ГАЗ КЕН ОРНЫ, СЕЙСМИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІК, ФЛЮИДОДИНАМИКА, ТЕХНОГЕНДІК ЖЫЛЖУЛАР, СЕЙСМИКАЛЫҚ ҚАУІП, ЖЕРГІЛІКТІ-ҒАРЫШТЫҚ ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ БАҚЫЛАУ.

OIL AND GAS FIELD OF UZEN AS THE BECOMING CENTER OF INDUCED SEISMICITY AND WAYS OF DECREASE IN ITS RISK

The basic natural and man-made factors of activation of seismic and deformation processes oil and gas a field of Uzen are considered, the reliability of the monitoring and forecasting of which determine the efficiency of field development , as well as protective measures to prevent dangerous engineering- geological processes.

The area of application of the results : the production activity of oil and gas fields , the ground- space geodynamic monitoring.

Keywords: OIL AND GAS FIELDS, SEISMICITY, FLUID DYNAMICS, TECHNOGENIC MOTIONS, SEISMIC RISK, GROUND-SPACE GEODYNAMIC MONITORING

Введение

Месторождение Узень приурочено к Южно-Мангистауской нефтегазоносной провинции молодой Туранской плиты. Оно было открыто в 1961 г. и введено в промышленную эксплуатацию в 1965 г. Продуктивные горизонты этого многопластового месторождения имеют сложное строение и содержат трудноизвлекаемые нефти с высоким содержанием парафинов, а также асфальто - смолистых веществ. Поэтому здесь изначально внедрялись различные способы повышения нефтеотдачи, включая закачку в нефтяные залежи горячей морской воды, что впервые в мировой практике стало осуществляться на месторождении Узень в 1966 г. [Надилов и др., 1982]. Вытесняя нефть к забоям эксплуатационных скважин, пластовые, а также вновь закачиваемые «чужие» техногенные воды стали производить здесь огромную тектоническую работу, определяемую сложным сочетанием природных и техногенных факторов. С одной стороны, это структурно-литологические и флюидодинамические особенности этого массива, сложившиеся в ходе длительной истории геологического развития платформенного чехла молодой Туранской плиты, а с другой, - неуклонно нарастающие техногенные нагрузки на недра месторождения Узень и соседних районов Мангышлака.

Бурение тысяч скважин, различные виды репрессий на продуктивные пласты, добыча урана по соседству во впадине Карагие, мощные подземные ядерные взрывы (ПЯВ) на полуострове во второй половине минувшего века д., - все это обусловило «ломку» массива горных пород и заметные сдвиги геодинамической активности региона. В частности ПЯВ, как показано в работе [Гамбургцев и др., 1994], исказили даже спектрально-временную структуру землетрясений Средней Азии, Кавказа и Иранского нагорья. К этому следует добавить геодинамический эффект резкого аномального подъема уровня Каспийского моря с 1978 по 1995 гг. с необычно высокой скоростью, достигавшей порой 32 – 40 см/год. Этот период совпал с интенсивным освоением недр месторождения Узень, т.к. в 1977 г. был утвержден план комплексной его разработки. Указанное повышение уровня Каспия соответствовало изменению давления более чем на 0,15 бар, что примерно в 15 раз превышает перепад давления вследствие приливных сил, способных вызвать землетрясение [Гамбургцев и др., 1994].

Сейчас дальнейшая судьба промысла Узень определяется тремя обстоятельствами. Во-первых, - различными методами регулирования множества добывающих, нагнетательных, а также простаивающих наблюдательных,

контрольных, пьезометрических и выходящих из бурения скважин, вскрывших два этажа нефтегазоносности в юрских и меловых отложениях, освоение которых длится уже полсотни лет [Нуршаханова, 2005]. Во-вторых, на месторождении Узень могут быть обнаружены новые промышленные скопления углеводородов в доюрском комплексе пород, подобные тем, что выявлены по соседству на структурах Оймаша, Северо-Ракушечное, Тасбулат, Южный Жетыбай и др. [Тимурзиев, 1989]. В-третьих, промысел осложняют частые аварии, прогрессирующее загрязнение окружающей среды, что требует значительных затрат на рекультивацию земель и другие природоохранные мероприятия [Димеева, Пермитина, 2002; Пермитина, Димеева, 2002].

Вместе с тем от внимания исследователей, промысловиков и властных структур ускользает тот факт, что на месторождении Узень, как и на других старых промыслах, назревают условия для активизации опасных подвижек недр и других инженерно-геологических процессов. И если своевременно не будут приняты необходимые защитные меры, то в обозримой перспективе такая активизация, несомненно, снизит ресурсный потенциал месторождения, затруднит его разработку, а заодно осложнит развязку сложнейшего клубка социально-экономических и экологических проблем региона.

Цель настоящей статьи – предупредить такую опасность, снизить её риск и показать необходимость добротной службы комплексного наземно-космического геодинамического мониторинга на месторождении Узень.

Достижение этой цели предусматривает решение трех задач: а) определить методику изучения вызванной сейсмичности; б) выявить соотношение природных и техногенных предпосылок вызванной сейсмичности месторождения Узень, а также первые признаки её проявления на полуострове Мангышлак; в) определить технологию мониторинга и прогноза геодинамических подвижек в окрестности месторождения Узень.

Предварительные замечания о методике и задачах исследований

Способны ли горные породы месторождения Узень к быстрому, лавинообразному разрушению, способному спровоцировать землетрясения? Пытаясь ответить на этот вопрос, мы исходим из того, что массив горных пород этого месторождения с его агрегатами минералов и скоплениями флюидов в виде подземных вод, нефтей и газов представляет собой гетерогенную, многокомпонентную, многофазную и неравновесную энергонасыщенную термодинамическую систему, условно обособляемую в теле молодой Туранской плиты. Судя по данным структурной

геологии, энергетическое состояние этой системы, неоднократно испытывало резкие скачки в геологическом прошлом на рубежах тектонической перестройки структуры земной коры региона. В этом ряду особо важен последний неотектонический этап такой резкой перестройки, который зародился в плиоцене, сохранил свою активность в четвертичном периоде, включая историческое время и наши дни. В последние годы естественный ход новейшего этапа перестройки структуры земной коры был осложнен техногенным вмешательством в недра месторождения Узень и обширных пространств Туранской плиты, мощность которого стала уже соизмеримой с мощностью природных тектонических процессов.

Проблема техногенных возмущений состояния недр освещена уже во множестве публикаций, обзор которых приведен в работе [Адушкин, Турунтаев, 2005]. В этой работе показано, в частности, что основными факторами вызванной сейсмичности при нефтегазодобыче являются: а) декомпрессия при добыче углеводородов; б) закачка жидкости в массив горных пород; в) изменение флюидного режима; г) неравномерное изменение газоводного контакта; д) изменение напряженно-деформированного состояния в массиве налегающих пород.

Порождаемые таким образом возмущения, подобные порой взрыву «пороховой бочки», хорошо известны. Примером тому служат разрушительные землетрясения на месторождении Газли 8 апреля и 17 мая 1976 г. (магнитуда $M=7.0$ и $M=7.3$), которое, как и месторождение Узень, приурочено к молодой Туранской плите, считавшейся прежде слабо активной в сейсмическом отношении. Показательна «раскачка» техногенной сейсмичности на древней Восточно-Европейской платформе, детально изученная на Ромашкинском месторождении нефти в Татарстане и других объектах [Адушкин, Турунтаев, 2005].

Примечательны также аварийные ситуации неподалеку от промысла Узень на структуре Ракушечная, уранодобывающем карьере, месторождении Тенгиз и других объектах, о чем ниже еще будет сказано. Отсюда возникает опасение, что дальнейшая активизация индустриальной деятельности на полуострове Мангышлак сузит радиус вызванной сейсмичности и в окрестности промысла Узень.

В целом массив горных пород месторождения Узень может рассматриваться как сложная динамическая система, устойчивость удерживающих связей которой предопределена длительной историей геологического развития

недр месторождения и весьма чувствительна к практически мгновенным или кратковременным природным и техногенным нагрузкам, способным спровоцировать резкие возмущения этой системы.

Энергетика деформационных процессов на месторождении Узень, несомненно, имеет свои особенности, сущность которых пока не вполне очевидна. В связи с этим ниже решаются три задачи: а) выявить геологические предпосылки нестабильности недр месторождения Узень; б) охарактеризовать сейсмичность и геодинамическую активность, техногенные подвижки недр в окрестности этого месторождения, а также стадии его разработки; в) обосновать схему комплексного наземно-космического геодинамического мониторинга месторождения Узень.

Геологические предпосылки нестабильности недр месторождения Узень

Природные геологические предпосылки активизации современных геодинамических подвижек недр месторождения Узень определяются тремя взаимосвязанными факторами: структурно-литологическим, неотектоническим и флюидодинамическим.

Структурно-литологический фактор. Месторождение Узень приурочено к Северокавказско-Мангышлакскому блоку Западно-Туранского сегмента земной коры, который был консолидирован в допалеозойское время в кадомскую (байкальскую) эпоху [Леонов и др., 2010]. В результате последующей длительной истории геологического развития этот сегмент обрел сложное складчато-блоковое строение и, начиная с позднего триаса - ранней юры, стал представлять собой размытую поверхность кристаллического фундамента в основании платформенного чехла молодой Туранской плиты. По мере накопления и неоднократных тектонических перестроек этого чехла в мезозое-кайнозое в его строении обособились четыре структурных этажа: триасово-нижнеюрский, среднеюрско-нижнемиоценовый, среднемиоцен-нижнеплиоценовый и верхнеплиоцен-антропогеновый [Вольвовский и др., 1966].

Месторождение Узень представляет собой брахиантиклинальную складку отложений платформенного чехла, которая осложняет северную часть Жетыбай-Узеньской тектонической ступени и вытянута в северо-западном направлении. В своде Узеньской брахиантиклинали обнажены размытые породы маастрихтского яруса.

Нижний структурный этаж платформенного чехла с угловым несогласием перекрывает здесь размытую поверхность кристаллического фундамента с карманами коры выветривания и представлен осадочными, а также вулканогенно-

осадочными отложениями триаса, которые вскрыты бурением на глубинах от 3280 до 3900 м.

Среднеюрско-нижнемиоценовый структурный этаж залегает с несогласием на более древних отложениях и в нижней своей части представлен континентальными или прибрежно-морскими угленосными песчано-глинистыми отложениями средней юры. Выше их сменяют морские терригенно-карбонатные толщи верхней юры и нижнего мела, морские песчано-глинистые в низах и карбонатные в верхах породы верхнего мела и, наконец, морские известняки, мергели и карбонатные глины палеогена-нижнего миоцена.

Среднемиоцен-нижнемиоценовый структурный этаж широко развит на Мангышлаке в обрамлении площади Узень и с угловым несогласием перекрывает более древние отложения. Он сложен полого залегающими слабо дислоцированными карбонатными закарстованными отложениями сарматского, мэотического и понтического ярусов, которые бронируют плато Устюрт и Мангышлак.

Верхнеплиоцен-четвертичный структурный этаж представлен континентальными озерно-соровыми и склоновыми отложениями, которые в прибрежной полосе Каспия сменяются морскими отложениями бакинского, хазарского, хвалынского и новокаспийского ярусов.

В том, что массив горных пород месторождения Узень весьма чувствителен к природным и техногенным нагрузкам на него и может являться сейчас «живым», убеждают особенности литологии, неотектоники и флюидодинамики этого месторождения.

Слои и пачки песчано-глинистых и карбонатных пород, которые слагают брахиантиклиналь Узень, обладают разными упругими и пластическими свойствами. Поэтому на одних уровнях, в частности, в глинистых толщах средней юры, здесь существуют предпосылки для пластического течения или ползучести слоев горных пород, а также формирования инъективных дислокаций в виде взаимного перемещения и разрывов сплошности слоев, их разбухания, внедрения непунических даек и т.д. На других уровнях, например, в юрских и меловых известняках, могут зарождаться тектонические и нетектонические трещины, а также разрывы, генетически связанные с подвижками блоков фундамента платформенного чехла, концентрацией и разрядкой напряжений, особенно на крутом крыле Жетыбай-Узеньской тектонической ступени.

Такие деформации слоистой структуры отложений платформенного чехла

осложняют литогенетические процессы разных стадий в системе минеральное вещество горных пород – органическое вещество – флюиды. Это проявляется в неравномерном уплотнении глинистых толщ, децементации или цементации, а также перекристаллизации терригенных и карбонатных пород, дегидратации их минеральных и органических компонентов и т.д. [Бурлин, Карнюшина, 2000; Добрынин, Кузнецов, 2000; Япаскурт, 2005]. Такие изменения имеют обычно разнонаправленный волновой, зачастую пульсационный характер и в целом представляют собой зародыш динамометаморфизма осадочных комплексов, ведущий к проявлениям стресса, термальных аномалий, флюидопереноса и т.д. Поэтому на месторождении Узень существуют естественные предпосылки для зарождения двух типов очагов горных ударов, а также вибрационных эффектов, микросейсм и землетрясений. Очаги первого типа сосредоточены, вероятно, вблизи границ структурных этажей платформенного чехла, т.е. на участках скачкообразного изменения состава и свойств пород месторождения Узень. Очаги второго типа могут возникать внутри этих комплексов на участках наиболее интенсивных литогенетических преобразований горных пород.

Неотектонический фактор. Плато Южного Мангышлака, включая месторождение Узень, приурочено к гигантской морфоструктуре Арало-Каспийского ареала новейшего прогибания, которая выделяется в рельефе области внутреннего стока Евразии. Наиболее погруженную часть этой морфоструктуры выстилают плиоцен-четвертичные отложения новейшей тектонической впадины Каспийского моря, которые отличаются тремя особенностями.

Во-первых, они залегают со значительным размывом, а также резким угловым и азимутальным несогласием на разновозрастных структурных этажах трех тектонических элементов земной коры: древней Восточно-Европейской платформы, молодых Туранской и Скифской плит, а также Кавказско-Копетдагской системы альпийских горно-складчатых сооружений.

Во-вторых, погребенный (предакчагыльский) рельеф подошвы плиоцен-четвертичных чрезвычайно изрезан, его размах закономерно нарастает от бортов к погруженным частям морфоструктуры от первых десятков и сотен метров до нескольких километров и достигает своего максимума (8-10 км) в районе Южно-Каспийской котловины.

В-третьих, плиоцен-четвертичные отложения отличаются чрезвычайно пестрым фациальным составом, неравномерным распределением мощности и, кроме того, имеют ряд других специфических особенностей структурных,

литологических и палеонтологических.

Совокупность этих признаков указывает на то, что формирование структурного этажа плиоцен-четвертичных отложений сопровождалось резкой перестройкой структуры земной коры и привело к обособлению наложенной гигантской морфоструктуры Арало-Каспийского ареала новейшего прогибания [Рисунок. 1].

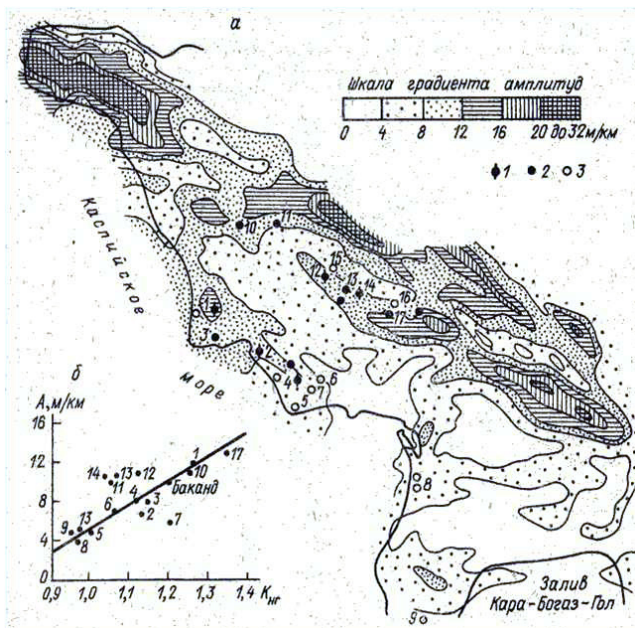


Рисунок. 1. Южный Мангышлак. Карта активности неотектонических (среднеплиоцен-четвертичных) движений

(а) и зависимость коэффициента негидростатичности K_{gr} от градиента их амплитуд A (б). [Гуревич и др., 1987].

Особенности неотектонических деформаций на Мангышлаке, включая площадь Узень, отражены во множестве работ [Вольвовский и др., 1966; Гуревич и др., 1987; Неводчикова, 1981; Никонов, Шолохов, 1995; Оздоев, 1998; Попков, Жданов, 1991; Попоков и др., 1992; Тажназарова, http; Тимурзиев, http; Шолохов, Никонов, 1994; Nikonov, Sholokhov, 1996]. Установлено, что неотектоническом этапе локальная структура Узень, как и соседние структуры Жетыбай и др., проявляли себя как брахиморфные поднятия, осложненные вновь образованными неотектоническими зонами повышенной трещиноватости. Эти новейшие брахиантиклинали не повторяют очертания локальных структур по поверхности слоев мезозойских отложений, имеют блоковое строение и осложнены новейшими

разломами, а также линейными зонами повышенной проницаемости земной коры, которые вытянуты по двум основным разновозрастным взаимно поперечным направлениям: субмеридиональному (новообразованному) и северо-западному или Горно-Мангышлакскому (реликтовому). На этом фоне изредка наблюдаются также северо-восточные простирания неотектонических структурных элементов. Такие разноплановые дислокации отражают картину резкой перестройки структуры земной коры Арало-Каспийского региона, которая отличается тремя особенностями. Во-первых, это интенсивное неравномерное погружение в плиоцен-четвертичное время наложенной новейшей тектонической впадины Каспийского моря, особенно её южного сектора. Во-вторых, переориентировка структурного плана этой впадины и разновозрастных тектонических элементов в её основании с субширотного (кавказского) направления на субмеридиональное (уральское). В-третьих, что особо важно, незавершенность такой перестройки до наших дней. Свидетельством тому служат изостатическая неуравновешенность, своеобразие теплового режима, а также современных подвижек земной коры рассматриваемого региона, что, несомненно, отозвалось на геодинамике и флюидодинамике массива горных пород месторождения Узень, а также его ландшафтах.

Отсюда, в частности, становится очевидной необходимость построения карт развития неотектонических трещин в массиве горных пород месторождения Узень на основе данных промысловых исследований и дешифрирования космоснимков. Флюидодинамический фактор и нефтегазоносность. В мезозойско-кайнозойском разрезе многопластового месторождения Узень развиты преимущественно гранулярные коллекторы порового типа с широким диапазоном изменения фильтрационных свойств. В домезозойских породах преобладает трещинный тип коллектора. К флюидоупорам в этом районе обычно относят: верхнепермско-нижнетриасовую красноцветную толщу известковистых аргиллитов и полимиктовых песчаников с прослоями вулканогенных пород; сенон-палеогеновую и верхнеюрскую глинисто-карбонатные толщи, глинистую толщу аптского яруса

В разрезе месторождения Узень выделено 25 продуктивных горизонтов, которые образуют два этажа нефтегазоносности: меловой и юрский. Меловой этаж является газоносным. Он сложен песчаными, алевроитовыми и глинистыми породами, включает 12 продуктивных горизонтов и имеет мощность более 700 м. Юрский этаж является в основном нефте- и нефтегазносным и разделяется

на две части: верхнюю и нижнюю. В его верхней части преобладают пластовые сводовые залежи, в которых выделен 51 нефтяной пласт. В нижней части юрского этажа наряду с этим, в пределах отдельных куполов, выделяются также массивные нефтяные залежи.

Пластовая температура от нейтрального слоя (25 м) возрастает на месторождении Узень от 14-150С до 1400С на глубине 3450 м. Причем температура верхней части разреза месторождения до глубины 400-450 м меньше, чем температура застывания узеньской нефти.

В зависимости от распределения пластовых давлений на месторождениях Южного Мангышлака выделяется три этажа: верхний (палеоген-меловой), средний (юрский) и нижний (доюрский). В верхнем этаже давления распределяются под влиянием рельефа и техногенной разгрузки через брошенные скважины. В среднем этаже распределение давлений близко к гидростатическому, равновесному. В нижнем этаже отмечены флюидодинамические аномалии инъекционного типа и, соответственно, аномально-высокие пластовые давления (АВПД).

Естественным режимом работы продуктивных горизонтов Южного Мангышлака и месторождения Узень является упруго-водонапорный режим, который сформировался, а точнее переформировался на новейшем этапе, о чем свидетельствует ряд фактов, которые перечислены в работах [Гуревич и др., 1987; Тимурзиев, [http](#)]. Одним из основных результатов новейших тектонических подвижек явилось то, что пластовые системы Южного Мангышлака обрели неравновесное состояние, что отражается в распределении пластовых давлений.

Новейший постплиоценовый этап тектонической активизации рассматриваемой территории Туранской плиты обусловил раскрытие путей миграции УВ, оживил разломы и зоны трещин в осадочном чехле, что нарушило равновесное состояние флюидных систем, привело к перераспределению пластовых вод, нефтей и газов. В результате, как показано в работе [Гуревич и др., 1987], вертикальная компонента вектора силы фильтрации более чем на три порядка превысила горизонтальную компоненту.

Для поддержания упруго-водонапорного режима с самого начала разработки месторождения Узень было предусмотрено поддержание пластового давления, что как будет показано ниже, оказалось весьма трудной задачей ввиду неравновесного состояния флюидных систем месторождения.

Сейсмичность, карст и гравитационно-оползневые природные явления.

В истории изучения сейсмичности Южного Мангышлака и соседних районов можно выделить два этапа: начальный и современный.

Начальный этап был связан с изучением в 1960-е годы геофизиками ВНИГРИ глубинного строения полуострова Мангышлак и плато Устюрт сейсмологическими методами [Димаков и др., 1967].

В период с 20 января 1965 г по 11 января 1967 г. ими было зарегистрировано 1374 землетрясения, из них 231 (20%) с разрешенными обменными волнами. По характеру записи продольных волн землетрясения удалось разделить на 4 класса: I – с четким одиночным импульсом Р; II – с двумя близко расположенными или интерферирующими импульсами волны Р; III – разность времен вступления между двумя следующими друг за другом волн Р равнялась 8 – 10 сек; IV – землетрясения с большим количеством импульсов. Основную часть обменных волн (93%) образуют I и II классы. По азимуту и эпицентральному расстоянию землетрясения приурочены в основном к Тихоокеанскому поясу сейсмичности (40% - в районе Алеутских островов и в меньшей мере в районе острова Итуруп, островов Японии, а также из Китая и Индонезии).

Наряду с этим в районе крупных разломов были зарегистрированы местные (тектонические) землетрясения в виде относительно высокочастотных колебаний с большим количеством слабых интерферирующих продольных волн. Наиболее интенсивные и разрешенные обменные волны с резко выраженной поляризацией были зарегистрированы на полуострове Бузачи. Были подмечены существенные различия в поведении обменных волн в районах Центрального Каратау, западной и восточной частей Южного Мангышлака, а также Западного Устюрта.

Особое внимание сейсмологи ВНИГРИ уделили интерпретации волн следующих местных землетрясений на Мангышлаке (в скобках - глубина очага, км): а) 17. 11. 1963 г. в 12 ч. 34 мин. ($14,7 \pm 1,7$); б) 15. 12. 1963 г. в 9 ч 02 мин. (19 ± 3); в) 23. 06. 1964 г в 6 ч. 37 мин., мыс Песчаный (18 ± 5); в) 24.01. 1965 г., п-ов Бузачи (55); г) 24. 02. 1965 г. в 11 ч. 59 мин, п-ов Бузачи (11); д) 22.03. 1965 г. в 20 ч 01 мин, 19 сек., п-ов Бузачи (62 ± 4).

Кроме того, с 20 ноября 1963 г. по 12 июня 1964 г. на Мангышлаке было зарегистрировано более десяти землетрясений с очень малыми временами запаздывания 2,3 – 2,9 сек, положение которых не удалось четко установить. Наконец, с 29 августа 1966 г. по 30 августа 1966 г. здесь было зарегистрировано три местных землетрясения, очаги которых располагались на глубинах всего 4,2; 5,6 и 7,3 км.

Ниже будут приведены также сведения о ряде землетрясений, спровоцированных на Мангышлаке и в соседних районах Туранской плиты подземными ядерными взрывами.

Современный этап характеризуют работы Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Геологического института РАН по оценке сейсмической опасности Северного Каспия [Отчет..., 2003]. Одним из результатов этих исследований явилось выделение Мангышлак-Устюртской зоны возможных очагов землетрясений, которая выражена на поверхности системой однонаправленных активных разломов и флексур, протягивающихся узкой полосой от п-ова Мангышлак на ВЮВ в пределы плато Устюрт.

А.А.Никонова [1996] по разрушению археологических объектов реконструирует в Западном Устюрте землетрясение с интенсивностью сотрясений в эпицентре до 8 баллов. Предположительный возраст этого события определяется в пределах 1717–1732 гг.

Расчеты современного напряженно-деформированного состояния вдоль сейсмического профиля Атрек–Сагиз выявили концентрацию сдвиговых напряжений и, соответственно, повышенную плотность упругой энергии сдвига в Мангышлак-Устюртской зоне, достигающую наибольших значений на глубинах 15–30 км при максимуме на глубине 20 км.

Принимая во внимание все доступные данные по активной тектонике, современной геодинамике, палео- и археосейсмичности, в работе ИО РАН и ГИН РАН для Мангышлак-Устюртской зоны ВОЗ было принято значение магнитуды максимально возможного землетрясения $M_{max}=6,5$ при весьма длительном (несколько тысячелетий) периоде повторяемости таких землетрясений T_{max} .

Сейсмографами ИО РАН в районе Актау за период октябрь-декабрь 2010 г. было зарегистрировано 45 удаленных сейсмических событий, происходивших на расстояниях 250–600 км от места регистрации.

Обнаруженные в этом районе эпицентры микроземлетрясений оказались приуроченными к нефтегазовым месторождениям, на которых в течение нескольких десятков лет ведется добыча углеводородного сырья. Предполагается, что эти микроземлетрясения имеют техногенную природу. Это предположение согласуется с данными Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан об активизации землетрясений в «асейсмичных» районах Казахстана [Михайлова и др., 2002].

Отметим также, что поскольку плато Мангышлак бронируется

закарстованными отложениями миоцена, то здесь существуют предпосылки для сейсмогравитационных дислокаций и провальных землетрясений [Потапова, 1983; Шолохов, Никонов, 1996; 2001].

Крометого, на Мангышлаке могут возникать землетрясения, спровоцированные резкими перепадами уровня Каспийского моря. Сейсмогенерирующая роль такого процесса подчеркнута, например, в работе [Уломов и др., 1999].

Техногенные подвижки недр

Неуклонное нарастание активности техногенных подвижек недр Мангышлака спровоцировано добычей углеводородов, добычей урана и подземными ядерными взрывами (ПЯВ). Примером тому служат авария в Казахском заливе, оползень на уранофосфорном карьере № 213 и особенности преобразования недр в зонах трех ПЯВ.

Авария в Казахском заливе. 9.09.1983 г. здесь в 23 км от мыса Ракушечный при глубине моря 43 м произошло обрушение самоходной передвижной буровой вышки «60 лет Азербайджана». Расчетная глубина бурения составляла 4500 м. Но на глубине всего 445 м, при проходке глин олигоцена, промывочная жидкость была перебита прорывом пластовых газонасыщенных флюидов. При утяжеленном глинистом растворе удалось пробурить еще 60 м, произвести спуск обсадной колонны диаметром 508 мм и поставить скважину на затвердение цемента, на что требуется обычно от 24 до 30 часов. Но уже через шесть часов вновь началось движение глинистого раствора из межколонного пространства. Вскоре из скважины на 50 метровую высоту взвился фонтан газа и начался интенсивный размыв грунта под одной из опор буровой, вышка накренилась, размыло грунт под второй опорой, и вышка рухнула. Это произошло ночью в штормовую погоду. Погибло два человека. Матросы подоспевшего судна всю ночь вылавливали из воды державшихся на воде людей. Прибывшие спасатели подожгли газ, чтобы он не отравлял атмосферу. Через 5 дней факел погас, и выброс вроде бы иссяк. Но 5.08.1991 г. аварийная скважина вновь зафонтанировала. Несколько лет тому назад водолазы КАСПНИРХ обследовали лежащую на дне буровую установку и обнаружили, что грифон подземных флюидов все еще действует. Подмечено, что металлические конструкции вышки не подверглись обрастанию морскими организмами, что объясняется непрерывной активностью грифона, выбрасывающего из недр в море токсичные газы и подземные воды. Для понимания причин этой аварии важны три особенности геологического строения Казахского залива.

Во-первых, бурение скважины проводилось вблизи поверхности сместителя Кендырли-Туаркырского разлома. Во-вторых, подвижки по этому разлому проявлялись в новейшее послепонтическое время и отразились в современном рельефе. Последнее означает, что активность этого разлома продолжается и в наши дни. В-третьих, как показано в работе [Гуревич и др., 1987] для этого района Песчаномысско-Ракушечной зоны поднятия характерны проявления АВПД в доюрском комплексе вулканогенно-осадочных пород и палеозойских гранитоидов. Зоны АВПД совпадают здесь с зонами максимальных эффективных газонасыщенных мощностей каверновых коллекторов вышележащих пород плитного комплекса. Наконец, над зонами АВПД отмечены флюидодинамические аномалии инъекционного характера.

Т.е. буровая скважина опрочетливо вскрыла одну из таких газо- и водонасыщенных аномалий, сосредоточенной в глинах олигоцена, что спровоцировало аварийный выброс разжиженной водо- и газонасыщенной пульпы этих глин.

Оползень на уранофосфорном карьере № 213. Более полувека назад усилиями многих геологов и Кольцовской экспедиции на полуострове Мангышлак в отложениях олигоцена были открыты богатейшие ураново-редкометалльные месторождения, приуроченные к толще глинистых отложений олигоцена. История изучения и особенности геологического строения этих месторождений детально изложены в монографии [Шарков, 2008]. В 1967 г. Прикаспийский комбинат начал здесь строительство карьеров и в 1970 г. приступил к разработке этих месторождений. Из двух крупных уранофосфорных карьеров стало извлекаться около 150 млн. м³ горных пород ежегодно [Мосинец, 1993]. Это обернулось тем, что в ночь на 16 декабря 1987 г. на карьере № 213 возникла аварийная ситуация. По фронту карьера в 900 м за 12 мин произошел оползень горной массы в 28 млн. м³ со стоящими на уступе экскаваторами, автосамосвалами, бульдозерами и другой техникой. Особо важно то, что этот оползень возник вдоль линии сопряжения тектонических разломов.

О подземных ядерных взрывах. С 1966 по 1987 гг. в Арало-Каспийском регионе в недрах Туранской было проведено девять подземных ядерных взрыва (ПЯВ) [Мирные..., 2001]. Каждый из них возбуждал землетрясение магнитудой от 5,1 до 6,1, а также афтершоки и, кроме того, длительные, не затухающие с годами, релаксационные изменения в состоянии массивов горных пород, возмущения режима подземных флюидов и т.д. Как видно из таблицы 1 и рисунк. 4,



Рисунок. 4. Подземные ядерные взрывы в Арало-Каспийском регионе [Мирные..., 2001].

наиболее мощными из этой серии оказались ПЯВ на Мангышлаке, заряды которых размещались на глубинах 407 – 740 м в толще карбонатных пород миоцена в непосредственной близости от поверхности водоупорных глин олигоцена.

Таблица 1. Подземные ядерные взрывы в Арало-Каспийском регионе (см. Рисунок.4)

№	Наименование	Дата	Координаты	Глуб. м	Мощн.кт	Магн
1	Урта-Булак	30.09.	6638,8N; 64,5E	1532	30	5,2
2	Памук	21. 05.	6838,916N; 65,159E	2440	47	5,4
3	Мангышлак-2Т	6.12.	6943,8S2N; 54,783E	407	30	5,8
4	Мангышлак-6Т	12.12.	7043,851N; 54,774E	740	80	6,1
5	Мангышлак-1Т	23.12.	7043,827N; 54,846E	470	75	6,1
6	Кратер	11.04.	72	1720	15	4,9
7	Меридиан-3	15.08.	7342,711N; 67,410E	600	6,3	5,3
8	Меридиан-2	19.09.	7345,635N; 67,850E	400	6,3	5,2
9	Батолит-2	03.10.	8747,605N; 56,227E	1002	8,5	5,2

Особенности поствзрывных геодинамических процессов в зонах этих ПЯВ пока не изучены. В настоящее время в работах [Голубов, 2008; 2009 а,б] предпринята попытка показать, что ПЯВ на Мангышлаке могли привести к дренированию вод Арала в сторону Каспия по закарстованному пространству пород миоцена, а те ПЯВ, которые проводились в долинах рек Амударья и Сырдарья привели к формированию ловушек фильтрационного перехвата поверхностных вод на подступах к Аралу. В результате это вызвало стремительное обмеление Аральского моря с 1969 г. с невиданной прежде скоростью, достигавшей порой одного метра в год. Это предположение, однако, нуждается в тщательной проверке.

Завершая этот раздел, отметим еще ряд аварийных ситуаций, связанных с освоением недр Прикаспия за пределами Южного Мангышлака.

Наиболее крупной из них явилась авария на месторождения углеводородов Тенгиз, которое расположено на суше вблизи берега Северного Каспия. Оно приурочено к бортовой зоне Прикаспийской впадины древней Восточно-Европейской платформы. 24 июня 1985 г. с пятикилометровой глубины из подсолевого структурного этажа этого месторождения из скважины № 37 под давлением почти в тысячу атмосфер вырвался мощный горящий фонтан из нефти и природного газа, насыщенного сероводородом. Фонтан взвился в атмосферу на высоту более 200 м, вышвырнул из скважины на поверхность многотонную колонну буровых труб, свернув их «макаронами», снес все близлежащие строения и бушевал в течение долгих месяцев. На укрощение аварии была брошена бригада ликвидаторов, оснащенная, в частности, большегрузным авиатранспортом для доставки необходимого оборудования с европейского склада «Камерон» стоимостью 2 млн. долларов. Аварии удалось ликвидировать лишь через четыреста дней, что сорвало тогда планы повышения добычи нефти в Казахстане от 18,7 млн. т в 1981 году до 25 млн. т в 1985 г и усугубило спад добычи нефти в СССР, наметившийся с 70-х годов. Связанные с этим энергичные действия Миннефтепрома СССР и ГКНТ СССР, которые описаны в работе [Гайказов, 2003], не исключали, вероятно, использования ПЯВ для ликвидации аварии на Тенгизе подобно тому, как это было сделано в 1966 и 1968 гг. при тушении газовых фонтанов на месторождениях Урта-Булак и Памук в Узбекистане соответственно. Реализации этого замысла, несомненно, помешала авария на Чернобыльской АЭС, которая произошла в том же 1986 г. незадолго до аварии на Тенгизе.

Подобные, но мене мощные выбросы пластовых флюидов происходили и на буровой установке «Сункар» во время испытаний скважин Восточный и

Западный Кашаган в Северном Каспии в период с марта 2000 г по апрель 2001 г. Геологические условия здесь сходны с теми, которые характерны для промысла Тенгиз. Резкие деформации массивов горных пород и возмущения режима высоконапорных флюидодинамических систем зафиксированы также в зонах ПЯВ на Астраханском, Оренбургском и Карачаганакском газоконденсатных месторождениях, а также на соляном куполе Азгир [Геворкян, Голубов, 1998; Голубов, 1994 а, б, в; 2005, 2007].

Отметим, наконец, подтопление прибрежной полосы суши перед защитной дамбой на северном берегу полуострова Бузачи в районе нефтяного месторождения Каламкас. Эта дамба стала подпирать здесь поток подземных вод, разгружающегося с суши в сторону Каспия, что привело к заболачиванию побережья. Особенности разработки и термодинамики месторождения Узень История и особенности разработки месторождения Узень рассматриваются в работах [Быков и др., 1978; Дмитриев и др., 1978; Лутков, Гаттенбергер, 1981; Надиров и др., 1982; Нуршаханова, 2005]. К 1981 г. в фонде скважин месторождения Узень числилось 2673 скважины, из которых вновь были пробурены 1851 добывающих, 748 нагнетательных и 111 специальных скважин. Основными объектами бурения являлись скважины верхнего этажа нефтегазоносности. В целом эти скважины были сгруппированы на четырех опытных участках: а) для закачки поверхностно-активных веществ (ПАВ); б) для «ступенчатого» термального заводнения; б) для избирательного заводнения; в) для циклического заводнения (рисунк. 2,3).

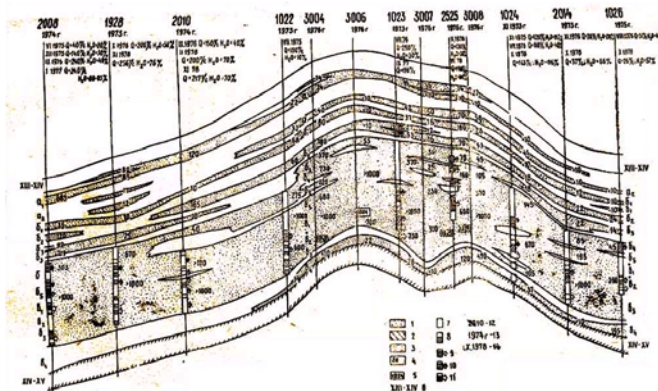


Рисунок 2. Пример обводнения пластов-коллекторов XIV горизонта пластовыми закачиваемыми водами [Надиров и др., 1982].

1 – нефтяной пласт-коллектор; 2 - нефтяной пласт-коллектор, обводненный нагнетаемой водой; 3 - нефтяной пласт-коллектор, обводненный минерализованной водой; 4 – коэффициент проницаемости, фм2; 5 – отметка текущего ВНК; 6 – глинистый раздел между горизонтами; 7 – интервал перфорации; 8 – дренируемый интервал пласта; 9 – приток нефти; 10 – нефти и воды; 11 – воды.

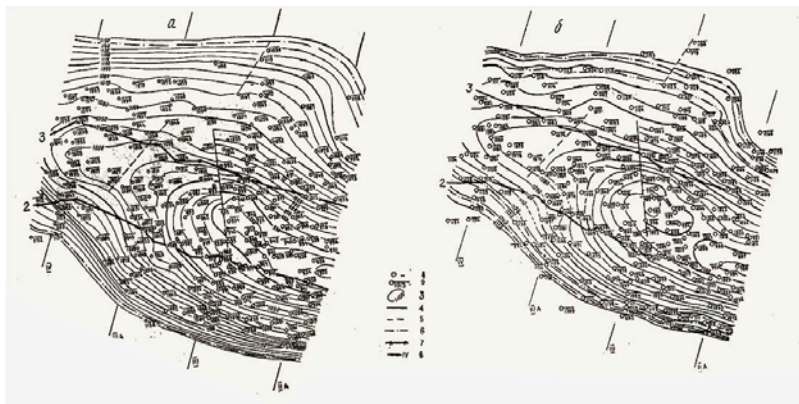


Рисунок 3. Структурная карта по кровле горизонтов месторождения Узень [Надилов и др., 1982]:

а – XV; б – XVI: 1 – скважина; 2 – абсолютная отметка; 3 – изогипсы; 4 – тектоническое нарушение установленное; 5 – предполагаемое; 6 – внешний контур нефтеносности; 7 – граница участка СТЗ; 8 – IV разрезающий ряд нагнетательных скважин для
 блокового заводнения

Проект разработки этого месторождения учитывал многопластовость, чрезвычайной неоднородность продуктивных горизонтов, аномальные свойствами нефтей и ряд других его особенностей, которые не были свойственны для месторождений других нефтегазоносных провинций. Поэтому изначально была утверждена закачка значительных объемов горячей морской воды Каспия в смеси с подземными водами альб-сеноманских горизонтов в нефтяные пласты месторождения Узень для поддержания пластового давления и пластовой температуры. Расстояние между нагнетательными скважинами составляло от 250 до 500 м. В добывающих скважинах забойное давление устанавливалось ниже давления насыщения газом на 25%.

Затем технологическая схема разработки месторождения неоднократно изменялась и корректировалась, что касалась в основном режима закачки в пласты воды разного состава и температуры. Несмотря на это, в 1972 г. показатели разработки месторождения оказались ниже проектных, что объяснялось в основном неравномерным продвижением нагнетаемой воды по разрезу продуктивных горизонтов, отклонениями от проекта обустройства месторождения и другими причинами. Выход из создавшегося положения усматривался в дальнейшем уплотнении сетки добывающих и нагнетательных скважин.

В 1977-1978 гг. был составлен новый комплексный проект разработки месторождения, реализация которого привела к заметному изменению величин забойных давления в добывающих скважинах, пластовых давлений в зонах

отбора, давлений нагнетания воды в низкопроницаемые пласты и т.д.

В 1980 г. Из месторождения было добыто 22,517 млн. т. жидкости. Но в целом, начиная с 1976 г. годовые отборы нефти и жидкости неуклонно снижались. В 1979-1980 гг. добыча нефти снизилась с 1,024 до 0,890 млн. т. Среднесуточный дебит одной добывающей скважины на месторождении снизился в 1978-1980 гг. с 23 до 16 т/сутки по нефти и с 51 до 39 т/сут по жидкости.

Параллельно с этим проводились избирательное наращивание объемов закачки горячей воды, эксперименты по закачке различных ПАВ, вязко-композитных материалов, а также циклическое, очаговое и блоково-ступенчатое термальное заводнение пластов и т.д. Все это изменяло энергетическое состояние нефтяных залежей, что отражалось в динамике пластовых давлений, температуры пластов и отзывалось также на структуре коллекторов, обводненности продукции, составе и свойствах пластовых жидкостей и газов.

Неравномерный характер охлаждения связан с тем, что в продуктивных пластах формируются небольшие по мощности, направленные от нагнетательных в сторону добывающих скважин зоны с высокими скоростями фильтрации жидкости и соответственно с ускоренным охлаждением горных пород. В скважинах, через которые проходят такие зоны, наблюдается быстрое обводнение и значительное снижение температуры. Т.е. закачка холодной воды существенно изменяет термодинамические условия в стволе действующих добывающих скважин. По мере обводнения дебит последних в результате повышения забойного давления начинает уменьшаться и соответственно возрастают тепловые потери при подъеме жидкости. Так, если разность между температурой жидкости на забое и устье скважины при дебите 100 т/сут и более, как показывают замеры, не превышает 10-15°C, то при дебите 30-40 т/сут она достигает 25-30 °C и на выходе из скважин температура жидкости лишь на несколько градусов выше температуры застывания нефти. Подход холодной воды к скважине по вырабатываемым пластам еще больше снижает температуру в стволе скважины [Лутков, Гаттенбергер, 1981].

Изменение температуры, в свою очередь, влияет на вязкость жидкости в скважине, причем вязкость образующейся в обводненных скважинах водонефтяной эмульсии с понижением температуры увеличивается в 6-8 раз быстрее, чем вязкость безводной нефти. Перечисленные явления затрудняют работу фонтанного лифта и приводят к остановкам скважин.

Более благоприятные условия для работы добывающих скважин создаются при закачке в пласты горячей воды с температурой, равной или больше пластовой,

что, однако, провоцирует развитие следующих разнонаправленных процессов.

Улучшая температурный режим фильтрации жидкости в зоне вытеснения и условия ее подъема в скважинах, нагнетание горячей воды, с одной стороны, позволяет извлечь нефть из отдельных пластов залежи, а с другой, - ведет к довольно быстрому обводнению соседних пластов.

Таким образом, в результате циклического и очагового заводнения залежей месторождения Узень возникли техногенные возмущения теплового режима и гидрофизической зональности его недр, что, в свою очередь, спровоцировало благоприятные предпосылки их геодинамической нестабильности.

Дело в том, что нагнетаемые на месторождении Узень прогретые воды являются поверхностно-активными, способны изменять свободную энергию на границах зерен минералов поликристаллических осадочных пород и, как следствие, резко снижать прочность пород (эффект Ребиндера). Поэтому буровые скважины с подвижным теплоносителем, являясь вскрывающими каналами и теплообменниками, изменяют естественный режим циркуляции подземных вод, способствуют образованию трещин гидроразрыва в пластах и тем самым провоцируют геодинамическую нестабильность массива горных пород. Все эти явления, однако, ускользают пока от внимания исследователей, которые по старинке полагают, что тепловые потоки в теле Туранской плиты, включая район Узени, формируются только за счет внутреннего тепла земной коры и радиоактивности осадочных пород.

Схема комплексного наземно-космического геодинамического мониторинга

Эта схема включает три основных элемента. Во-первых, это дистанционный мониторинг деформаций земной поверхности при помощи космических средств, который предусматривает использование: а) дифференциальной интерферометрии радарными с синтезированной апертурой (DInSAR); б) интерферометрии радарными с синтезированной апертурой с использованием отражений от постоянно присутствующих объектов (PSInSAR). Эти технологии позволяют достигнуть миллиметровой точности определения вертикальных и горизонтальных смещений в сотнях точек на кв.км.

Во-вторых, это наземный мониторинг современных подвижек массивов горных пород с использованием средств сейсмологии, высокоточной геодезии и геоморфологии.

В-третьих, - анализ данных промысловых исследований о режиме подземных вод, нефтей и газов, перепадах пластовых давлений, динамике заводнения пластов,

состоянии скважин, аварийных ситуациях и т.д.

Результатом обобщения полученных таким образом данных является создание имитационной геомеханической модели месторождения, которая включает: а) геолого-структурное описание массива, рельефа его поверхности, основных разломов и нарушений; б) оценку естественного напряженного состояния массива; в) построение карт: физико-механических свойств пород массива, особенностей его блочного строения, распределения трещин (рисунок. 5)

и т.д. Цель создания такой модели сводится к оценке аномального напряженно-деформированного состояния недр, прогнозу аварийных ситуаций и разработке соответствующих превентивных мероприятий.

Выводы

1. Месторождение Узень в настоящее время находится в неравновесном термодинамическом состоянии, которое было предопределено тремя основными факторами:

а) первичными структурно-литологическими особенностями осадочных толщ месторождения, сформированными в ходе длительной истории геологического развития этого участка молодой Туранской плиты;

б) резкой неотектонической перестройкой структуры земной коры региона в плиоцен-четвертичное время, которая, судя по ряду признаков, не завершилась в настоящее время;

в) техногенной дестабилизацией недр Южного Мангышлака, включая месторождение Узень, в результате добычи углеводородов (с закачкой значительных объемов горячей воды), добычи урана, а также ряда ПЯВ, которые проводились на полуострове во второй половине минувшего века.

2. На стареющем промысле Узень существуют явные предпосылки для активизации сейсмических и деформационных процессов, от надежности мониторинга и прогноза которых зависят эффективность разработки месторождения, а также защитных мероприятий по предотвращению опасных инженерно-геологических процессов.

3. Наиболее эффективным способом решения этой проблемы является создание системы комплексного наземно-космического геодинамического мониторинга сейсмических и деформационных процессов на месторождении Узень в сочетании с методами промысловых скважинных и наземных исследований.

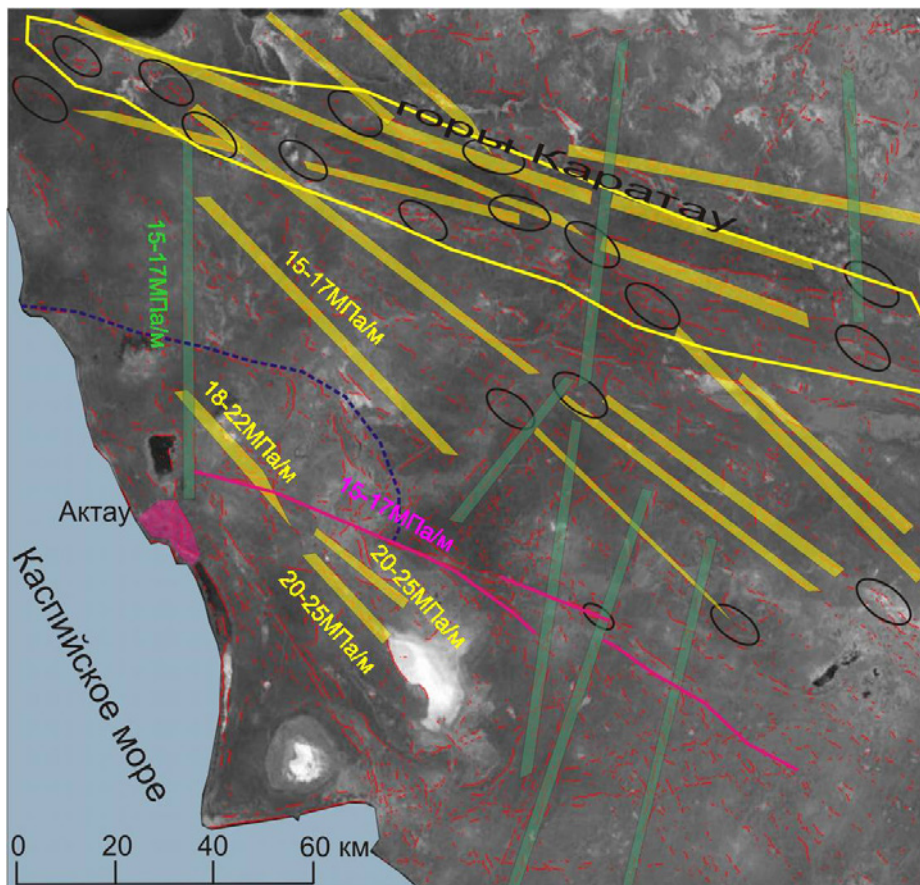


Рисунок.5. Карта значений сдвиговой жесткости разломных зон Южного Мангышлака

Литература

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005 – 252 с.
2. Бененсон В.А., Гофман Е.А., Цатурова А.А., Алексева Л.В., Громова Н.К. Мезозойские отложения Южного Мангышлака. Стратиграфия и корреляция. М.: Наука, 1970, 120 с.
3. Бурлин Ю.К., Карнюшина Е.Е. Преобразования коллекторов нефти и газа в литогенезе.// Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. Материалы к I-му Всероссийскому литологическому совещанию. Т. 1. Москва, 2000, с. 135 – 136.

4. *Быков Н.Е., Зудакина Е.А., Ефремова Л.Н. и др.* Исследование оценочных скважин месторождения Узень. Нефтегаз. геол. и геофиз., 1978, № 1, с. 23-27. Вольвовский И.С., Гарецкий Р.Г., Шлезингер А.Е., Шрайбман В.И. Тектоника Туранской плиты. Труды ГИН АН СССР. Вып. 165. М.: Наука, 1966, 288 с.
5. *Гайказов М.Н.* Василий Александрович Динков – гордость нефтяной державы. М.Недра. 2003. – 391 с.
6. *Геворкян С.Г., Голубов Б.Н.* О деформациях полостей подземных ядерных взрывов в районе Астраханского газоконденсатного месторождения. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2.1998, с. 17-37.
7. *Голубов Б.Н.* Аномальный подъем уровня Каспийского моря и техногенная дестабилизация недр. Изв. РАН, серия географич. 1994 а), № 1, с. 59 – 74.
8. *Голубов Б.Н.* Особенности современной геодинамической активности Арало-Каспийского региона. Изв. РАН серия географич. № 6, 1994 б), с. 96 – 100.
9. *Голубов Б.Н.* Последствия техногенной дестабилизации недр Астраханского газоконденсатного месторождения в зоне подземных ядерных взрывов. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1994 № 4 с. 25-42.
10. *Голубов Б.Н.* Подземные ядерные взрывы как фактор перераспределения подземного стока и противофазного поведения уровней Аральского и Каспийского морей. V Международная конференция «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий. 04-08 августа 2008 г. Боровое, Казахстан: Тезисы докладов. Курчатов: НЯЦ РК, 2008.- с. 55 -56.
11. *Голубов Б.Н.* Техногенные возмущения флюидодинамического режима недр как причина стремительного обмеления Аральского моря и аномального подъема уровня Каспия. Геологические опасности. Материалы XV Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск.2009 а. С. 144-147.
12. *Голубов Б.Н.* Соотношение природных и техногенных факторов эволюции подземной связи вод Аральского и Каспийского морей. Геология морей и океанов. Т. V. Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 16-20 ноября 2009 г. М.: ГЕОС. 2009 б, с. 302- 305.
13. *Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В.* Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004, 342 с.
14. *Гуревич А.Е., Крайчик М.С., Батыгина Н.Б. и др.* Давление пластовых флюидов. Л.: Недра, 1987.- 223 с.
15. *Димаков А.И., Должанский Б.Г., Тамаров А.И.* Изучение глубинного

геологического строения Мангышлака и западной части Устюрта сейсмологическим методом. ВНИГРИ. Отчет по теме № 97. Ленинград 1967.

16. Димеева Л. А. Пермитина В. Н. Биологическая рекультивация техногенных экосистем Восточного Прикаспия. // Биологическая рекультивация нарушенных земель. Материалы Международного совещания 3—7 июня 2002 г. с. 83 – 92.

17. Дмитриев Л. П., Ильяев В. И., Лейбин Э. Л., Огай Е. К. Основные этапы разработки месторождения Узень. – Труды КазНИПИнефть, 1978, вып. 5, с. 11-19.

18. Добрынин В. М., Кузнецов О. Л. Петрофизическое моделирование природных геодинамических процессов в осадочных бассейнах. Геофизика, № 3, 2002, с. 59 – 69.

19. Ж.Ш. Жантаев, Н.Г. Бреусов, А.Ж.Бибосинов, К.А. Дауренбек, А.В. Иванчукова, Б.А. Искаков, А.Г.Фремд Казахстан – Использование распределения скоростных неоднородностей в разработке геодинамического обоснования системы GPS наблюдений в Прикаспийском регионе// «Космос на благо человечества – взгляд в будущее» Тезисы докладов Международной конференции. HighDIDI, 2010- 200 с. Алматы, 43,44 с.

20. Жантаев Ж.Ш., Мухамедгалиев А. Ф., Бреусов Н.Г. Система комплексного мониторинга разливов в акватории Каспийского моря// Научно технический журнал «Нефть и газ» г. Алматы №2 (62) 2011г. с. 119-127.

21. Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Маар Г.Н., Жантаев Ж.Ш., Абсаматов М.К., Намвар Р.А-А., Бреусов Н.Г., Фремд А.Г. Сейсмологический мониторинг Южно-Мангистауского региона нефтедобычи Западного Казахстана// Научно технический журнал «Нефть и газ» г. Алматы №2 (62) 2011г. с. 129-139.

22. Жантаев Ж.Ш., Бреусов Н.Г., Фремд А.Г. Система геодинамического мониторинга Казахстанской части Прикаспия// Международная научно-практическая конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований». // РК, г. Алматы, –3-4 октября 2011

23. Исмаил-Заде А.Т. Миграция сейсмической активности Каспийского моря// Геодинамика и прогноз землетрясений. Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука. 1994, с. 27 - 32.

24. Леонов Ю.Г., Волож Ю.А., Антипов М.П., Быкадоров В.А., Хераскова Т.Н. Консолидированная кора Каспийского региона: опыт районирования. Труды Геологического ин-та. Вып. 593. М.: ГЕОС, 2010. – 64 с.

25. Лобковский и др. ОТЧЕТ о научно-исследовательской работе по договору №229 от 01.03.2003 между ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» и

Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН «Детальные сейсмологические и геодинамические исследования с донными станциями в районе перспективного освоения месторождений углеводородов на акватории Северо-Западного Каспия». Москва. 2003. Фонды ИО РАН. 350 с.

26. *Лутков В.А., Гаттенбергер Ю.Д.* Методика и результаты контроля за температурными изменениями разрабатываемых горизонтов месторождения Узень. Геология нефти и газа, 1981 № 10, с. 25-28.

27. *Мелик-Пашаев В.С., Гаттенбергер Ю.П., Лутков В.А.* Геотермический режим нефтяного месторождения Узень. - Сов. геология, 1973, № 3, с. 29-38.

28. *Мелик-Пашаев В.С., Быков Н.Е., Долина Л.П. и др.* Особенности геологического строения нефтяного месторождения Узень / - Труды ВНИИ. М., 1977, вып. LXIII, с. 1-230.

29. *Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Неделков И.Н.* Новые данные о землетрясениях в «асейсмичных» районах Казахстана. Четвертые геофизические чтения им. В.В. Федынского 28 февраля – 02 марта 2002 года. Тезисы докладов. М.: 2002, с. 22 - 23.

30. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении./ Кол. Авторы под рук. Проф. В.А. Логачева - М.: Изд.АТ, 2001. - 519 с.

31. *Мосинец В.Н.* Геомеханические проблемы крупных горнопромышленных регионов. X Междунар. конф. По механике горных пород. 27 сентября – 1 октября 1993 г. Тезисы докладов. М. 1994, с. 16 – 31.

32. *Надилов Н.К., Вахитов Г.Г., Сафронов В.Г., Дергачев А.А., Дмитриев Л.П., Батырбаев М.Д.* Новые нефти Казахстана и их использование. Технология повышения нефтеизвлечения. – Алма-Ата. Наука, 1982. – 276 с. // Биологическая рекультивация нарушенных земель. Материалы Международного совещания 3—7 июня 2002 г. с. 83 – 92.

33. *Неводчикова Л.Б.* Послепонтические врезы юга Туранской плиты и их влияние на миграцию углеводородов. Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Геол., 1981, Т. 56, вып. 5, с. 137 – 151.

34. *Никонов А.А.* Разрушительное землетрясение на Мангышлаке // Физика Земли. 1994. № 5. С.71-74.

35. *Никонов А.А.* Археологические и исторические свидетельства разрушительного землетрясения на Устюрте в XVIII веке // Рос. археология. 1996. № 1. С.80-92.

36. *Никонов А.А., Шолохов В.В.* Геологические и геоморфологические признаки молодого правого сдвига в зоне Центрально-Устьюртского разлома // ДАН. 1995. Т.345. № 6. С.786-790.
37. *Нуришаханова Л. К.* Анализ методов воздействия и оценка изменения свойств нефти в процессе разработки месторождения Узень : Дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 : Москва, 2005 148 с. РГБ ОД, 61:05-5/2129.
38. *Оздоев С.М.* Структурное положение и перспективы нефтегазоносности Устьюрта. Бюлл. МОИП. Отд. Геологич. 1988, т. 63, вып. 3, с. 14 – 21.
39. *Пермитина В. Н., Димеева Л. А.,* Трансформация почвенного покрова нефтегазовых месторождений Восточного Прикаспия.// Биологическая рекультивация нарушенных земель. Материалы Международного совещания 3—7 июня 2002 г. с. 383 – 392.
40. *Попков В.И., Жданов С.М.* Молодые деформации горизонтального сжатия на Южном Мангышлаке. Геотектоника, 1991, № 5, с. 81-92.
41. *Попков В.И., Нугманов Я.Д.* Значение восходящих тектонических движений в формировании структуры Южно-Мангышлакского прогиба. Изв. АН СССР. Сер. геологич., № 6, 1983, с. 113 – 120.
42. *Попков В.И., Рабинович А.А.Тимурзиев А.И.* Новые направления поисков залежей нефти и газа на Мангышлаке. Геология нефти и газа, № 6. 1992. С.
43. *Потапова Г.М.* Типы карста и закарстованности плато Южного Мангышлака и юго-западной окраины Устьюрта. Изв АН Каз. ССР, сер. геологич. № 1, 1983, с. 69 – 72.
44. *Султанов А.С., Гусейн-Заде О.Д., Гусейн-Заде С.О.ДильбазиЗ.Г., Гаджиев Б.А.* Влияние колебаний уровня Каспийского моря на хозяйственную деятельность в Прикаспийском регионе. Геодезия и картография № 4,1998, с.43 - 45.
45. *Тажназарова Н.А.* Роль миграционных процессов в формировании нефтяных залежей Южного Мангышлака <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/752/262>.
46. *Тимурзиев А.И.* Новейшая тектоника и нефтегазоносность запада Туранской плиты. <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/132/262/>.
47. *Тимурзиев А.И.* Строение и формирование резервуаров и ловушек в доюрском комплексе
48. Мангышлака. Геология нефти и газа № 9, 1989, с. 15-18.
49. *Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А.* Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 250

с.

50. Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря. Физика Земли, 1999, № 12, с. 76 - 82.

51. Фундамент, основные разломы Туранской плиты в связи с нефтегазоносностью. Коллектив авторов. Ред. А.А.Бакиров. М.: Недра, 1970, 248 с.

52. Шаранов А.И., Нурманов А.М., Плещеев И.С., Токарев В.П. Тектоника Тюб-Карагана (п-ов Мангышлак) и его перспективы на нефть и газ // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1980. Т.55. № 4. С.9-14.

53. Шарков А.А. Ураново-редкометалльные месторождения Мангышлака и Калмыкии, их генезис. М.: Эслан, 2008, 220 с.

54. Шолохов В.В., Никонов А.А. О новейшей структуре Мангышлака. Геотектоника, 1994, № 6, с. 64 – 77.

55. Шолохов В.В., Никонов А.А. О сейсмогравитационных образованиях на Мангышлаке. Геоморфология, 1996, № 1, с. 97 – 102.

56. Шолохов В.В., Никонов А.А. Карстово-гравитационные полости Южного Устюрта: возникновение и развитие. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001, № 5, с. 445 – 457.

57. Янакурт О.В. Основы учения о литогенезе. Изд-во Московского ун-та. 2005, 380 с.

58. Nikonov A.A., Sholokhov V.V. Active faults of the Touran Platform // J. Earthquake Prediction Res. 1996. Vol.5. No.3. P.383-393.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ
РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ

Дауренбек К.А.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В статье рассмотрен метод геометрического моделирования, который позволяет наглядно представить закономерности в распределении эмпирических данных.

Область применения результатов: науки о Земле, геофизика

Ключевые слова: ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИКИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ

Мақалада геометриялық модельдеу әдісі көрсетілген. Бұл әдіс эмпирикалық деректердің үлестіру заңдылықтарды көрнекті әдіспен елістіруге мүмкіншілік береді.

Нәтижелердің қолдану облысы - Жер зерттеу ғылымы, геофизика

Түйінді сөздер - ГЕОФИЗИКА КЕРІ ЕСЕПТЕРІ, ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ
МОДЕЛЬДЕУ

The paper presents a method of geometric modeling, which allows to visualize the patterns in the distribution of the empirical data.

The area of application of the results: Earth sciences, geophysics.

Keywords: INVERSE PROBLEMS OF GEOPHYSICS, GEOMETRIC MOD-
ELING

При решении задач геофизики, одного из направлений в науках о Земле, используется, как правило, аппарат широкого круга математических дисциплин. Одной из наиболее важных задач в геофизических исследованиях является определение внутреннего строения Земли, т.е. распределения внутри Земли физических характеристик - плотности, намагниченности, магнитной восприимчивости, электропроводности, упругости, температуры. Математически, каждую характеристику можно представить в виде варьируемого (переменного) параметра (X), например, плотность – X_1 , намагниченность – X_2 и т.д. Решение краевых задач, соответствующих прямым задачам геофизики, можно рассматривать как математическое моделирование геофизических процессов. Вместе с этим, в геофизике и обратные задачи являются основными математическими задачами. Теория обратных задач, как в геофизике, так и вообще в дифференциальных уравнениях, развита значительно меньше, чем теория прямых задач [1].

Традиционное математическое моделирование представляет собой функцию вида:(1)

$$y=f(x^n)$$

где x^n – входные параметры (характеристики) в количестве n .

Прямая задача – исследование модели, в которой параметры считаются известными, для извлечения полезного знания об объекте. Обратная задача – тип задач, часто возникающий во многих разделах науки, когда значения параметров модели должны быть получены из наблюдаемых данных. В данной статье предлагается метод геометрического моделирования геофизических процессов, который позволяет наглядно получить общую картину различных эмпирических данных.

Рассмотрим двухпараметрический (или двухфакторный) процесс. Для того чтобы получить представление о свойствах объекта, необходимо создать его модель. Модель будет включать в себя следующие параметры: глубины границ раздела слоев (параметр X_1) и свойства пород в каждом слое (параметр X_2). Используя математические зависимости между элементами модели можно вычислить теоретические значения поля для заданных условий его наблюдения [2, 3]. Модель представляет собой двумерную (2D) гиперповерхность, как показано, например, на рисунке 1. Назовем данную гиперповерхность как 2D - поверхность P^1 [4].

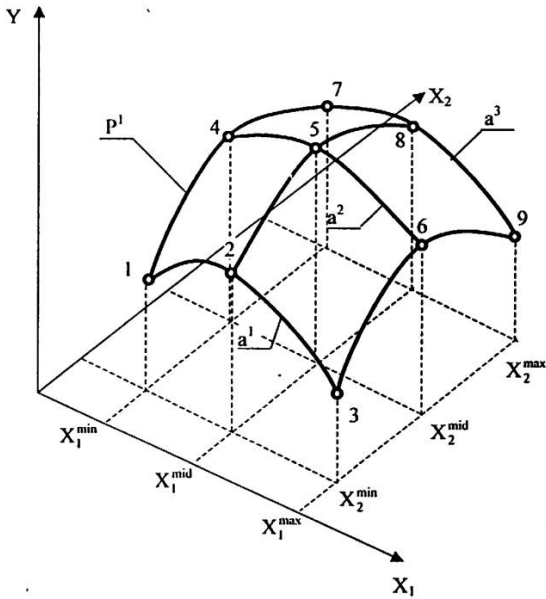


Рисунок 1 – Каркас
двумерной поверхности
P1 (k=2) в трехмерном
пространстве E3

Приведенную на рисунке 1 поверхность можно представить в виде полного комплексного чертежа (рисунок 2).

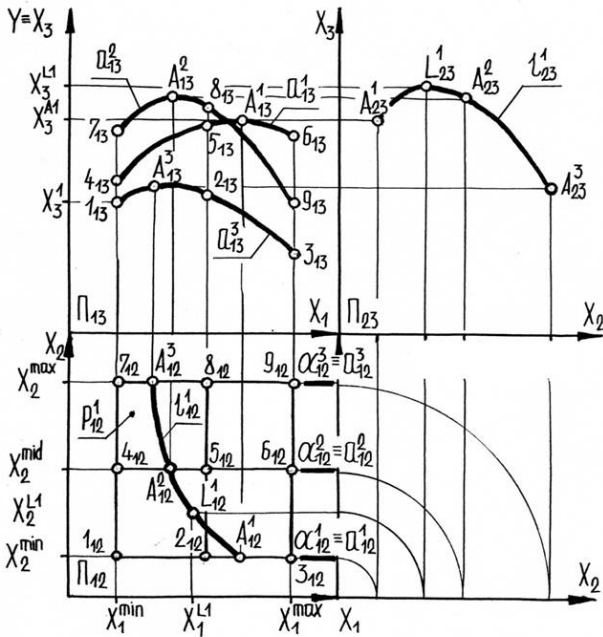


Рисунок 2 – Полный
комплексный чертеж
2D-поверхности

В случае необходимости можно определить уравнение 2D-поверхности P^1 , проходящей через три кривые a^1, a^2, a^3 . Уравнение 2-поверхности P^1 выражается интерполяционной формулой Лагранжа, которая после упрощения будет иметь следующий вид:

$$y_{p1} = f(x_1, x_2) = A_0 + A_1x_1 + A_2x_1^2 + A_3x_2 + A_4x_2x_1 + A_5x_2x_1^2 + A_6x_2^2 + A_7x_2^2x_1 + A_8x_2^2x_1^2, \quad (2)$$

где y_{p1} – отклик (выходной параметр); A_0, \dots, A_8 – коэффициенты уравнения; x_1, x_2 – входные параметры.

Эту методику можно обобщить для случаев с большим числом входных параметров $k \geq 2$. Например, для случая $k=3$ (три входных фактора), гиперповерхность может иметь вид, показанный на рисунке 3.

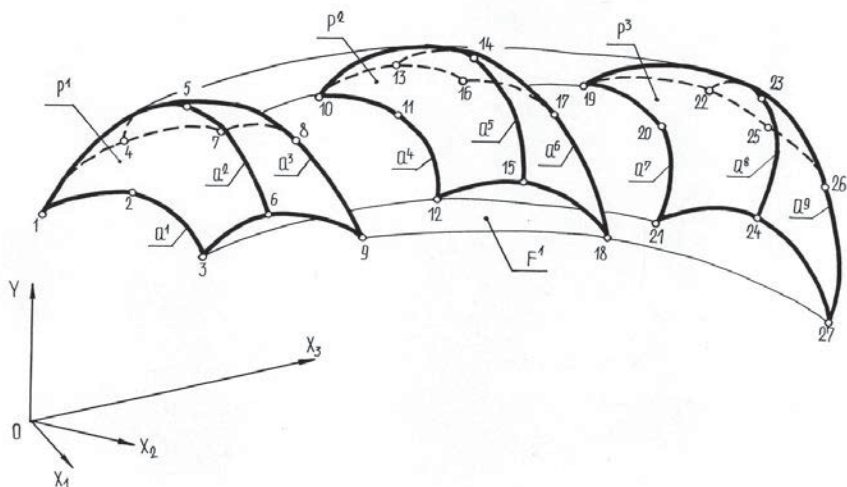


Рисунок 3 – Каркас поверхности отклика F^1 в пространстве E^4

Используя данный полный комплексный чертеж можно решать как прямую, так и обратную задачи, то есть по заданным параметрам найти отклик, либо по известному результату (отклику) определить значения соответствующих параметров.

Литература

1. Математические проблемы геофизики (<http://emf.ipgg.nsc.ru/mpg/>)
2. Косьянов А.Н., Сосов В.А. Методология решения обратных задач геофизики // Молодой ученый.–2012. –Т.1, №1. –С. 77-79. <http://www.moluch.ru/archive/36/4143>.
3. Бизюкин С.В., Кочнев В.А. Исследование возможностей адаптивного метода для решения обратной задачи МТЗ //Геология и геофизика. – 1988. – № 7. –С. 62-67.
4. Дауренбек К. А. Геометрическое моделирование многомерной поверхности отклика свойств материалов на примере бетонной смеси. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тараз. –2004. –28с.

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ОЦЕНКА
НЕФТЕПЕРСПЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Иванчукова А.В., Кирсанов А.В., Туребекова Д.Н.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В статье приведен обзор методов дешифрирования космоснимков, реализация которых позволяет решать задачи выявления нефтеперспективных структур на ранней стадии поисковых геологоразведочных работ.

Область применения результатов: геология, геофизика

Ключевые слова: ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, КОСМОСНИМКИ, КОСВЕННЫЕ ПРИЗНАКИ, НЕФТЕПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕРРИТОРИИ

Осы мақалада ғарыштық суреттерді қайта шифрлеу әдістері, қарастырылған. Бұл әдістер геологиялық іздеу жұмыстарының алғаш мезеттерінде мұнайға перспективті құрылымдарды анықтау мәселелерін шешуге мүмкіндік береді.

Нәтижелерді қолдану аумағы: жер құрылысын, геофизика

Өзекті сөздер: ЖЕРДІҢ ДИСТАНЦИЯЛЫҚ БАРЛАП БАЙҚАУ, ҒАРЫШ СУРЕТІ, ЖАНАМА БЕЛГІЛЕР, МҰНАЙ ПЕРСПЕКТИВАЛЫ ТЕРРИТОРИЯЛАР

This article provides an overview of satellite imagery interpretation techniques, the implementation of which can solve the problem of oil-bearing structures to identify at an early stage of exploration of search.

The area of results applications: geology, geophysics

Key words: REMOTE SENSING OF THE EARTH, SPACE IMAGE, INDIRECT SIGNS, OIL-BEARING AREA

Для выявления нефтеперспективных территорий и поиска мест возможной локализации месторождений углеводородов, помимо наземных, всё чаще используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). И хотя результаты дешифрирования спутниковых снимков земной поверхности пока не позволяют выходить на точный прогноз, применение данных ДЗЗ вполне оправдано на рекогносцировочном этапе, так как позволяет существенно снизить затраты наземных геофизических исследований за счёт выявления ряда косвенных признаков, свидетельствующих о возможных скоплениях углеводородов. В статье рассмотрены некоторые из методик, получивших наибольшее распространение в практике дешифрирования спутниковых снимков.

Геоморфологический метод, в котором в качестве косвенных поисковых признаков нефтепроявлений используется качественный анализ структурных форм рельефа, и, в частности, разломной тектоники, включающей линейные и кольцевые образования [1]. Технология обработки и анализа космических снимков, предполагающая комплексирование с геолого-геофизическими данными, позволяет выполнять районирование территорий (региональный этап) с выявлением наиболее перспективных участков, а также проводить детализацию выявленных структурных форм (поисково-оценочный этап) [2].

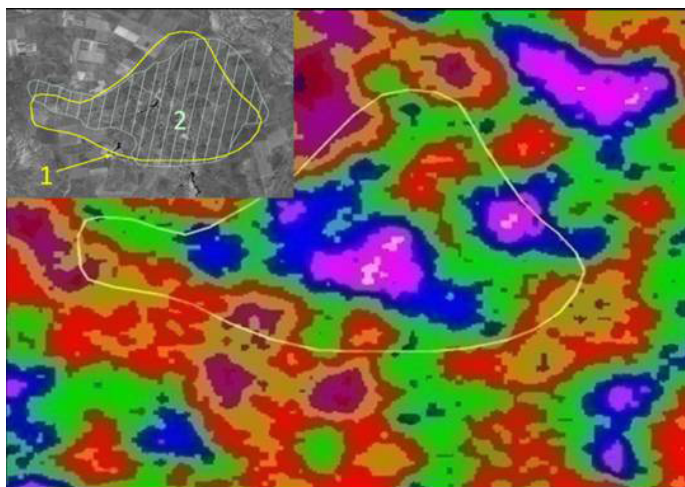
Одним из направлений геоморфологического метода является линеаментный анализ космических снимков, в основе которого лежат результаты структурно-геоморфологического дешифрирования, то есть выделение крупных линейных или дугообразных элементов рельефа, генетически связанных с разрывными нарушениями. В линеаментный анализ входит комплекс методов геологического картирования, основанных на обработке информации, которая по способам получения и формату данных, подразделяется на три класса:

- материалы дистанционных аэрокосмических исследований;
- топографические карты и карты геологического содержания;
- геологические, геофизические и иные данные.

При выполнении линеаментного анализа одним из поисковых признаков являются зоны геодинамического влияния активных разрывных нарушений геологической среды, с которыми часто связаны месторождения углеводородов (рисунок 1). Зоны геодинамического влияния представляют собой ограниченные, протяжённые в плане участки земной коры, сопряжённые с основным разрывным нарушением, которые характеризуются пониженной прочностью, повышенной трещиноватостью, и, как следствие, повышенной сейсмичностью и флюидопро-

ницаемостью, обеспечивающих миграцию и скопление последних в ловушках.

На рисунке 1 показана карта значений плотности линеаментов, построенная для участка земной поверхности, включающего нефтегазоконденсатное месторождение Карачаганак. На врезке контуром со штриховкой показана зона повышенной плотности линейных элементов, которая интерпретируется как ослабленная зона повышенной проницаемости. Пространственно она совпадает с контуром газо-водяного контакта и на этом основании может свидетельствовать о взаимном соответствии мест локализации углеводородов и зоны повышенной плотности линеаментов.



На врезке: 1 – контур газо-водяного контакта (ГВК); 2 – автоматически построенная зона максимальной плотности линеаментов.

Рисунок 1 – Распределение значений плотности линеаментов территории, включающей месторождение Карачаганак [2]

Сопоставление пространственного размещения известных месторождений углеводородов подтверждает их приуроченность к зонам разломов. На рисунке 2 представлена карта участка Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), где цветом показано отношение содержания метана к суммарному значению предельных углеводородов, а зелеными линиями – системы разрывных нарушений. Очевидно, что участки максимального содержания метана приурочены к узлам пересечений разрывных нарушений, показанных красным контуром. Отсюда следует, что разломы и узлы их пересечения выступают в роли каналов миграции углеводородов и вместе с тем могут служить местами возможной локализации их скоплений. И на этом основании можно сделать вывод, что основной задачей дешифрирования космоснимков является выявление

и соответствующая интерпретация разломных форм и смежных с ними участков.

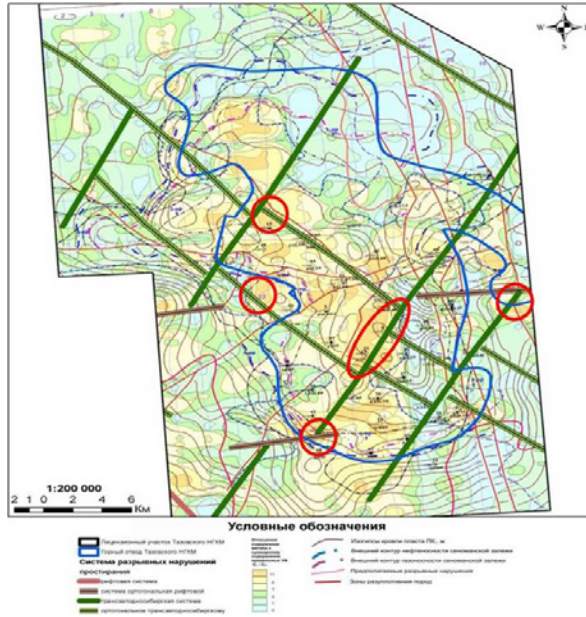


Рисунок 2 – Просачивание углеводородных газов от залежи к поверхности на примере участка Тазовского НГКМ

В результате обработки космического снимка, полученного со спутника с разрешением 30 м (рисунок 3А), удаётся выделить основной диагональный разлом и множество его оперяющих ортогональных и диагональных структурных линий, составляющих приразломную область (рисунок 3 Б).

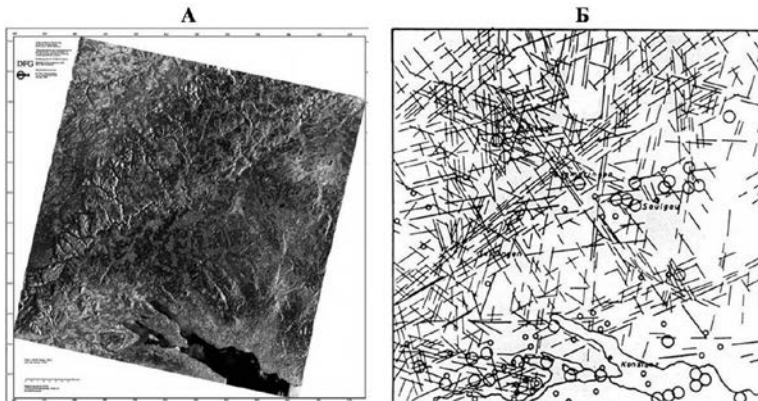


Рисунок 3 – Радиолокационное изображение (А) спутника ERS-1 (22.01.1995 г.) на юго-западе Германии и его схема линейментов (Б)

Линеаментный анализ выполняется с использованием программных продуктов канадской компании EASI/PACE, имеющей модуль GeoAnalyst или ERDAS IMAGINE с российским модулем LESSA. С помощью последнего становится возможным проводить выявление линейных элементов, определять доминирующие направления (8 направлений) и описывать их свойства, строить розы-диаграммы и рассчитывать плотности линейных элементов. Результат расчёта плотности показан на рисунке 1. Результаты расчетов подгружаются в ГИС программы (ArcView, MapInfo) для дальнейшей геолого-геофизической интерпретации [3]. Эффективность линеаментного анализа подтверждается результатами наземных геолого-поисковых работ, подтверждающих соответствие выявленных линеаментов с разрывными нарушениями на основе сопоставления с различными геолого-геофизическими данными, представленными в ГИСе в виде карт.

Ландшафтный метод. Наряду с линеаментным анализом на исследуемой территории, проводится анализ ДДЗ в видимом, радиоволновом и в инфракрасном диапазоне. Мигрируя от залежи к поверхностному слою Земли, лёгкие фракции углеводородов скапливаются в почве, оказывая влияние на корневую систему растений. Микропросачивание углеводородов вплоть до поверхностных почв сопровождается вторичной метаморфизацией минералов, в результате чего над залежами углеводородов наблюдается повышенная концентрация таких металлов как титан, ванадий, никель и медь [2]. Таким образом, происходит изменение окраски растений и в ареале месторождения регистрируется изменение фоновых характеристик растительного покрова, связанных с повышенной концентрацией металлов в почве. Растения, испытывающие стрессовое состояние в результате повышенной концентрации металлов в почве, изменяют свои спектральные характеристики. При этом устойчивое изменение спектра удается выявить только на длинах волн от 680 до 750 нанометров. В этом диапазоне проходит граница «зеленого цвета», которая при угнетении растительности перемещается в сторону коротких волн (в сторону синего) в среднем не более чем на 20 нанометров, в результате чего это явление получило название «голубой сдвиг» (рисунок 4) [2]. Анализируя значения спектральной яркости в этом канале, можно распознать области повышенного содержания металлов в почвах, что является косвенным признаком наличия в разрезе углеводородов.

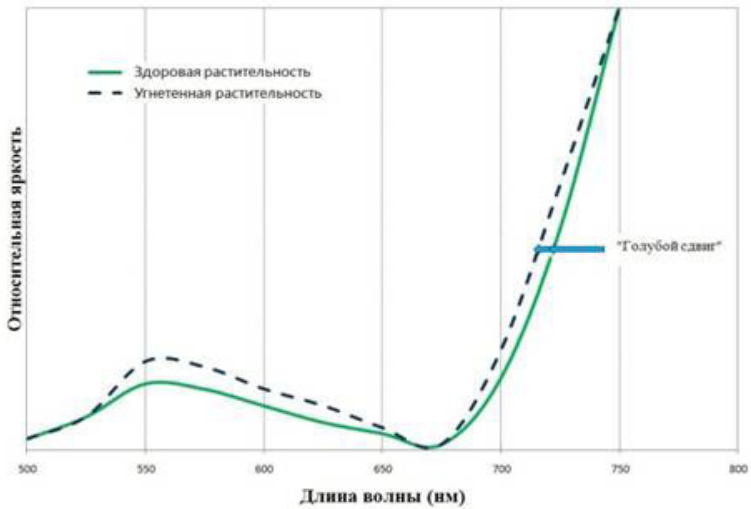


Рисунок 4 – Изменение спектральных характеристик у растений, испытывающих стрессовое состояние на длинах волн от 680 до 750 нм [2]

В настоящее время существует два космических аппарата (КА), оснащённых специальными каналами для регистрации отражательной способности крайней зеленой зоны – WorldView-2 с каналом 700-730 нм и RapidEye с каналом 690-730 нм, а также гиперспектральный космический аппарат Hyperion с 220 каналами в диапазоне от 430 до 2400 нм.

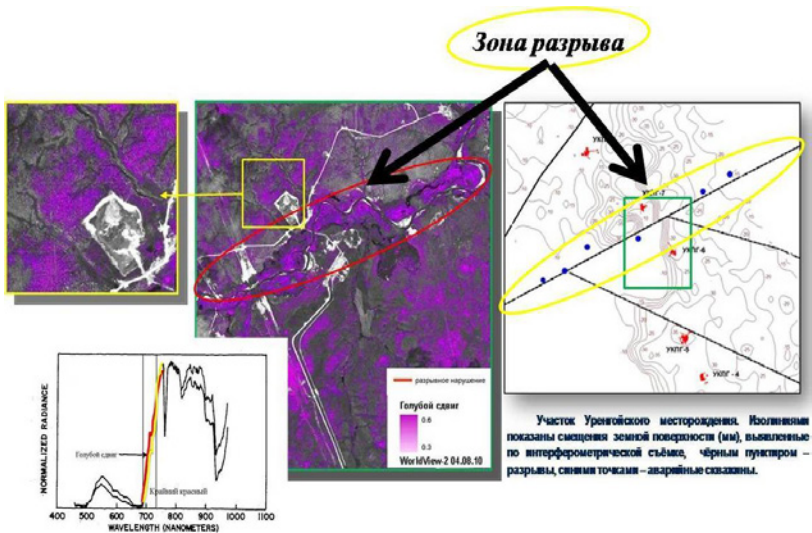
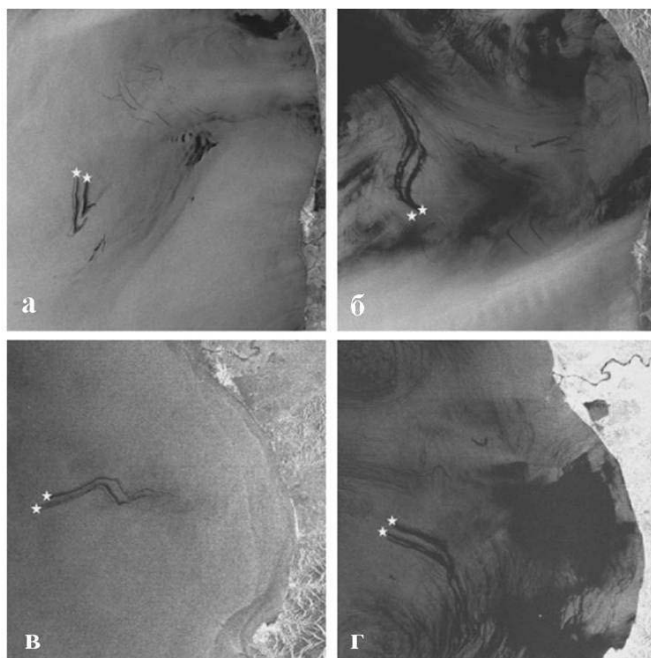


Рисунок 5 – Результат расчета «голубого сдвига» по данным КА WorldView-2

Расчет «голубого сдвига» по мультиспектральному космическому снимку WorldView-2 позволил идентифицировать растительность на ранней стадии угнетения (рисунок 5). Разрывные нарушения в неглубоко залегающих от земной поверхности породах прослеживаются полосами относительно густой растительности, соответственно по этим нарушениям легкие фракции углеводорода просачиваются в приповерхностные слои земли, оказывая влияние на почву, а, следовательно, и на растительность (рисунок 5). По снимкам теплового инфракрасного диапазона строят карты температур поверхности, позволяющие выделять ареалы продуктивных структур и наиболее активные разрывные нарушения [3].

Естественные источники нефти в пределах акваторий. В ходе мониторинга нефтяных загрязнений Черного моря в архивах Европейского космического агентства и инженерно-технологического центра «СКАНЭКС» были обнаружены радиолокационные изображения (РЛИ) акватории со спутников ERS 1/2, Envisat и Radarsat 1, на которых отображены грифонные пятна нефти на поверхности моря. В зависимости от гидрометеорологических условий площадь, занимаемая нефтяной пленкой составляет от 3 до 21 кв. км (в среднем 9,7 кв. км).



*Звездочками
показано положение
источников:*

а – ERS-2 от 22.12.1998

б – ERS-2 от 13.08.2002

в – Envisat от 6.05.2011

г – Envisat от 17.05.2011

Рисунок 6 – Фрагменты РЛИ
(70 × 70 км) с грифонными
пятнами [5]

Осадочный чехол восточной части материкового склона и впадины Черного моря сложен осадочными породами [4]. Полагают [5], что в толще осадочного комплекса существуют благоприятные условия для образования углеводородов, которые через проницаемые зоны различных геологических структур и их нарушений, через водную толщу выходят на дневную поверхность. Вначале нефть с газом поступают в район дна, а затем с той или иной периодичностью, углеводороды выделяются в виде капель или пузырьков газа. Газ, достигнув поверхности моря, уходит в атмосферу, а нефть, скапливаясь и растекаясь, образует многокилометровые пятна (слики) (рисунок 7), которые видны из космоса (рисунок 6). Идентификация обнаруженных сликов производится по их форме, размерам, степени кластеризации (повторяемости во времени и пространстве) и самое главное, по их геопространственной привязке к достоверно известному источнику на дне. Имея значительно большую толщину, чем биогенные пленки, грифонные пятна существуют на поверхности моря в более широком диапазоне скоростей ветра – до 6-8 м/с, то есть наблюдаются и тогда, когда биогенные пленки уже исчезли с поверхности.

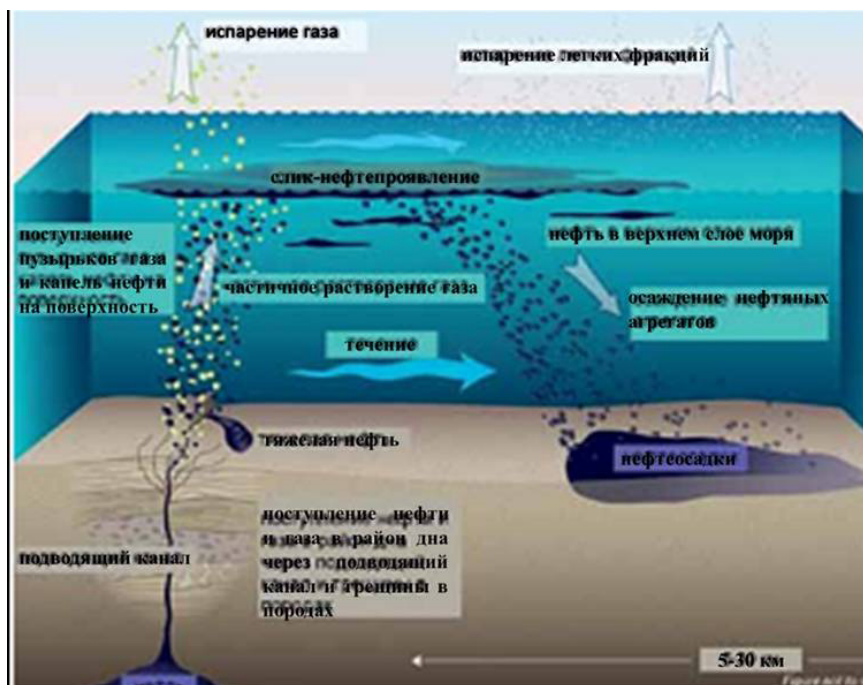
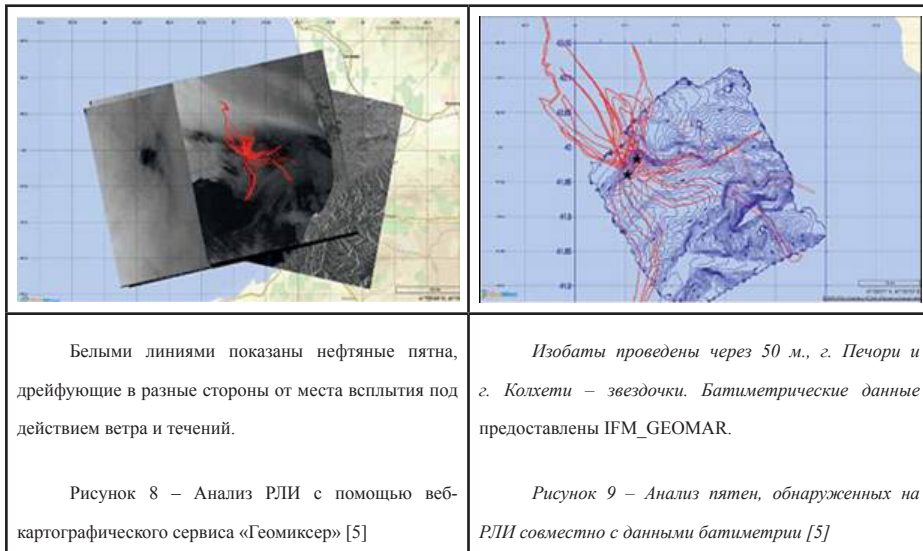


Рисунок 7 – Механизм образования естественного нефтепроявления [5]

В данном случае, выявление их источника выполнялось путём анализа разновременных радиолокационных спутниковых снимков высокого разрешения с использованием 16-ти разновременных радиолокационных изображений Envisat и Radarsat-1, полученных в период 2003–2011 гг. Для этого использовался вебкартографический сервис “Геомиксер”, который позволяет выделять и измерять площадь пятен, определять координаты мест всплытия нефти на поверхности и устанавливать периодичность их появления с оценкой объемов выбросов (рисунок 8). Оценку выбросов нефти также можно получить путем измерения площадей пятен на радиолокационных снимках на основе простых физических соображений, связывающих толщину нефтяной пленки с ее окраской, которая меняется от радужной в месте всплытия до серебристо-серой на периферии пятна с привлечением данных батиметрии (рисунок 9).



Совмещение в ГИС точек всплытия нефти по данным радиолокации с детальными батиметрическими данными, показало, что в этом месте на дне расположены две положительные формы рельефа – купола гг. Печори и Колхети, которые, очевидно, и являются источниками выбросов нефти, что подтверждается данными независимых исследований [6, 7, 8].

Опыт работы с данными радарной съёмки показывает, что в целом точность географической привязки РЛИ составляет $\pm 15-20$ м [5].

Выводы

Косвенные методы «доказательств» нефтеперспективности той или иной территории с использованием данных спутниковой съемки, имеют под собой научную доказательную базу, позволяющую использовать полученные результаты, в комплексе с данными наземных изысканий и опорой на картографические материалы, для перехода на реальный прогноз нефтеперспективности. В настоящее время данные спутниковой съемки позволяют снизить затраты на проведение изыскательских работ по нефтеперспективности, как во временном, так и в финансовом выражении, а в дальнейшем, по мере развития аппаратурно-методических приёмов дешифрирования космоснимков, прогноз нефтеперспективности территорий на основе данных ДЗЗ займёт прочное место в практике поисковых геологоразведочных работ на нефть и газ.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Разработать технологии наземно-космических мониторинговых наблюдений за развитием геодинамических процессов на территории Прикаспийского региона и прогнозирования месторождений углеводородного сырья».

Литература

5. *Потапенко А.* Тенденции в развитии методов разведки месторождений нефти и газа // ТехСовет – Путеводитель по эффективным техническим решениям, Рубрика «Нефтегазовый комплекс». Октябрь 2010. № 9 (83).
6. *Кулапов С.М.* Комплексный анализ геологоразведочных работ (Газпром ВНИИГАЗ) // Территория Нефтегаз. // М.: ЗАО «Камелот Пабблишинг». –2010. –№ 10. –С. 40-47.
7. *Васильева Н.В., Хайдукова Д.М.* Возможности использования данных дистанционного зондирования в геологии (ООО «Технология 2000») //Сборник докладов Выставка «Горное дело: Технологии, оборудование, спецтехника», РФ, г. Екатеринбург, ноябрь 2010 г.
8. *Kruglyakova R.P., Vyakov Y.A., Kruglyakova M.V. et al.* Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor // Geo-Mar. Lett. –2004. –№ 24(3). –P. 150-162.
9. *Евтушенко Н. В., Иванов А. Ю.* Нефтепроявления в Юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации //Исследование Земли из космоса. –2012. –№ 12. –С. 66–73.
10. *Wagner-Friedrichs M., Bulgay E., Keil H.* Gas seepage and gas/fluid migration associated with the canyon-ridge system offshore Batumi (Georgia, south-eastern Black Sea) inferred from multichannel seismic data // Int. J. Earth Sciences. – 2011.
11. *Klaucke I., Sahling H., Weinrebe W. et al.* Acoustic investigation of cold

seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Marine Geology. – 2006. –Vol. 231. –P. 51-67.

12. Preliminary results of the Black Sea SAR Project// Report NT0005638_QPROct Dec2010. USA National Energy Technology Laborator. –2010.

13. Трофимов Д.М., Никольский Д.Б., компания «СОВЗОНД», Захаров А.И., ИРЭ РАН Возможности и результаты практического использования спутниковой радиолокационной съемки и интерферометрии при геологоразведочных работах на нефть и газ <http://www.sovzond.ru/about/publications/543/4063.html> / М.: 2008.

ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ КАК ОТКРЫТОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗ-РАДИАЦИЯ

Сомсиков В.М.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Охарактеризованы этапы развития исследований динамических процессов в атмосфере, начиная от создания простейших моделей в рамках термодинамических приближений и заканчивая рассмотрением атмосферы, как самосогласованной неравновесной системы газ - радиация. Обсуждаются пути развития физико-математического аппарата для описания необратимых процессов эволюции в открытых неравновесных системах, какой является атмосфера.

Область применения результатов: атмосфера, науки о Земле

Ключевые слова: ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ, ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТЫХ
НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ

Атмосферадағы динамикалық үрдістерді зертеулердің даму кезеңдері сипатталған, онай үлгілердің құрылуынан бастап термодинамикалық жуықтау шектері және газ –радиация тепе-теңдік емес жүйедегі өзара келісілген атмосфералық қарастыруларымен аяқталады. Ашық тепе-теңсіздік жүйедегі, атмосфераның қайдай болатыны қайтымсыз процестердің дамуын сипаттау үшін физико-математикалық аппараттарды дамыту жолдары талқыланады.

Нәтижелерді қолдану аумағы: атмосфера, Жер туралы ғылымдарда.

Кілттік сөздер: АТМОСФЕРА ДИНАМИКАСЫ, АШЫҚ ТЕПЕ-ТЕНДІК
ЕМЕС ЖҮЙЕНІҢ ДАМУЫ.

Described the stages of development studies of dynamical processes in the atmosphere, from the creation of the simplest models in the thermodynamic approach and ending with the consideration of the atmosphere, as a self-consistent equilibrium of gas - radiation. The development of physical and mathematical tools to describe the irreversible evolution in open nonequilibrium systems, what is the atmosphere is discussed. . The area of application of the results: Atmosphere, Earth Sciences
Keywords: ATMOSPHERIC DYNAMICS, EVOLUTION OF OPEN NONEQUILIBRIUM SYSTEMS

Введение

Атмосфера Земли – открытая самосогласованная неравновесная система газ-радиация. Неравновесность и открытость атмосферы, главным образом, определяются потоком солнечной радиации. Радиация обеспечивает постоянное присутствие в ней потоков энергии и газа, задает пространственно-временную структуру атмосферы, ее состав и отклонение от равновесия [1-5]. Поэтому чтобы построить динамическую модель атмосферы с учетом эволюционных процессов, ее следует рассматривать, как самосогласованную открытую неравновесную систему газ-радиация.

На первых этапах построения динамических моделей атмосферы, роль потока солнечной радиации сводилась как к источнику крупномасштабных возмущений, в частности, приливов в атмосфере, вызванных сменой дня и ночи [4]. Приливы рассчитывались на основе равновесной термодинамической модели атмосферного газа. Солнечная радиация при этом играла роль регулярного теплового источника крупномасштабных возмущений атмосферы. Первопричиной возникновения этих возмущений служит суточная вариация потока солнечной радиации. Создаваемая таким источником неоднородная структура атмосферы имеет масштабы, соизмеримые с масштабами Земли и с периодами, сравнимыми с периодом суток. Природа такой структуры связана с относительно медленным нагревом атмосферы днем и ее остыванием ночью.

Помимо крупномасштабной структуры атмосферы, поток солнечной радиации создает мелкомасштабную структуру атмосферы. Эта структура, главным образом, обусловлена переходными процессами в атмосфере в области солнечного терминатора (СТ) – границы раздела освещенной атмосферы Солнцем и находящейся в тени Земли. СТ генерирует пространственно-временные неоднородности параметров атмосферы по всей ее толще. Они имеют периоды от минут до нескольких часов и охватывают весь земной шар. Природа таких неоднородностей значительно сложнее, чем приливов. Это обусловлено тем, что из-за быстрого изменения потока солнечной радиации в области СТ, происходят относительно резкие изменения параметров атмосферы, возникают различные нелинейные динамические процессы в околоземной плазме [7,8].

Как в случае приливов, так и в случае более мелкомасштабных неоднородностей атмосферы, генерируемых СТ, расчеты возмущений атмосферы проводились на основе уравнений газодинамики при условии выполнения термодинамических приближений равновесного газа для фоновой модели

атмосферы [4, 7, 8, 23]. Т.е. при этом не учитывалось, что сама пространственно-временная структура атмосферы, ее состав также не равновесны и определяются зависящим от времени потоком солнечной радиации.

Необходимость использования упрощенных моделей атмосферы, линеаризованных уравнений газодинамики, вызвано большими трудностями, которые возникают на пути изучения открытых неравновесных систем. Эти трудности в основном связаны с нелинейными эффектами и отсутствием разработанных математических аппаратов для их изучения. Термодинамическое приближение, в котором пренебрегают нелинейными эффектами, позволяет получить аналитический вид поля возмущения атмосферы. Но при этом исключается возможность учета и изучения эволюционных процессов в атмосфере, связанных с изменениями ее состава, а также пространственно-временной структуры, которая возникает при вариациях солнечной активности и других внешних факторов. Т.е. исключается возможность рассмотрения атмосферы, как открытой неравновесной системы газ-радиация.

Необходимость изучения атмосферы, как открытой неравновесной системы, назрела в последние десятилетия. Это, главным образом, связано с резким изменением климата [6, 24]. Существующие динамические модели атмосферы, построенные в рамках равновесной термодинамики, уже не в силах описать эволюционные процессы перестройки атмосферы, которые определяются изменениями внешних факторов, прежде всего таких, как солнечная радиация и антропогенные факторы. Но прежде, чем приступать к такому изучению атмосферы, нужно выяснить, какую роль в ее динамике играют факторы открытости и неравновесности и затем развит необходимый математический аппарат.

На первом этапе изучения атмосферы как открытой неравновесной системы выполнялись оценки производства энтропии в атмосфере при ее взаимодействии с солнечной радиацией [2]. Производство энтропии - наиболее важный параметр, свидетельствующий о степени неравновесности атмосферы. Эти расчеты подтвердили существенную роль открытости атмосферы в ее энергетических потоках. Позже были рассмотрены некоторые особенности баланса энтропии [9]. На основе теоремы о минимуме производства энтропии рассматривался также вопрос об устойчивости и экстремальных свойствах модели климата [10]. Выполнялся комплексный анализ наблюдений по долговременным изменениям радиационного баланса в атмосфере с целью выявления тенденций изменения климата [11]. Эти исследования подтвердили идею о том, что дальнейшее

улучшение динамической модели атмосферы невозможно, если не учитывать ее неравновесность и открытость.

Чтобы понять вклад неравновесности в неоднородную структуру атмосферы, был выполнен анализ дисперсионного соотношения для акустико-гравитационных волн с учетом их нелинейной взаимосвязи с поглощаемой солнечной радиацией [22]. Этот анализ позволил определить инкремент неустойчивости, обусловленной взаимосвязью радиации и атмосферы. Оказалось, что данная неустойчивость может быть существенной для гравитационной ветви колебаний атмосферы (с периодами от 5 мин. и более) в восходные часы на высотах 100 км.

Исследовались характерные особенности в собственных колебаниях атмосферы, обусловленные влиянием потоков солнечной радиации на динамические свойства атмосферного газа. Исследования проводились на основе линеаризации эмпирических уравнений неравновесной термодинамики, записанных для системы атмосферный газ - солнечная радиация [12, 13]. В результате обнаружен существенный сдвиг спектра собственных колебаний, определяемый взаимодействием радиации с атмосферой. Эти расчеты прекрасно подтвердились экспериментальными наблюдениями. Оказалось, что спектр собственных колебаний атмосферы в дневные часы более высокочастотный, чем в ночные часы. Эти результаты окончательно подтвердили мнение о том, что без учета факта неравновесности атмосферы, обусловленной солнечной радиацией, невозможно построить ее эволюционную модель. Но, как выяснилось в последствие, на пути создания такой модели атмосферы стоит много проблем. Одна из основных проблем в построении модели атмосферы, как открытой неравновесной системы, заключается в том, что существующий математический аппарат, который опирается на уравнения газодинамики, непригоден для описания неравновесных, нестационарных процессов. Для создания необходимого аппарата требуется развитие физики неравновесных систем, т.е. физики, описывающей нестационарные диссипативные процессы на всех иерархических уровнях трансформации энергии в системах, в частности, энергии солнечной радиации [15,16]. Ниже покажем, как можно построить такой аппарат. Для этого будут рассмотрены следующие вопросы:

- каким образом модифицировать уравнения неравновесной термодинамики, чтобы их можно было использовать для изучения динамических свойств и структуры системы газ-радиация при условии ее нестационарности и сильной неравновесности;

- какие трудности нужно преодолеть для создания математического аппарата, позволяющего описывать открытые неравновесные системы;

- как развивать физику эволюции, т.е. физику, позволяющую изучать процессы возникновения, развития открытых неравновесных систем, какой является атмосфера.

Открытые неравновесные системы

Поскольку определение открытых неравновесных систем являются сравнительно новым и многие относящиеся к нему понятия пока еще не устоялись, ниже дадим ему расширенное определение. Оно поможет раскрыть суть излагаемого материала.

Открытыми принято называть такие системы, которые обмениваются с внешним миром энергией, импульсом, массой, информацией [6]. Но в соответствии с таким определением получается, что в природе все системы являются открытыми. Ведь всем телам присуще равновесное излучение. Тем не менее, очевидно, что для многих изучаемых явлений такая открытость роли не играет. Поэтому чтобы можно было пользоваться определением открытости, его следует доопределить. На практике для широкого класса задач вполне можно считать системы открытыми только в том случае, если открытость определяет изучаемые процессы. В соответствии с этим, будем называть систему открытой только в том случае, если внешние факторы, изменения внутренней энергии определяют изучаемые процессы в системе [14].

Другим важным для динамики систем является понятие равновесия. Распределенная в пространстве система, состоящая из достаточно большого количества элементов, является равновесной, если для любой ее физической точки такие термодинамические параметры, как давление, плотность, температура, одинаковы. Но если хотя бы одно из этих условий нарушается, то систему следует считать неравновесной. Здесь и далее под понятием физической точки будем подразумевать достаточно малую область системы по сравнению с параметром задачи, но, тем не менее, содержащую такое количество элементов, которое позволяет использовать для нее термодинамические понятия [14].

Для равновесной системы производство энтропии равно нулю. Это означает, что в равновесных системах отсутствуют потоки энергии и вещества. Напротив, система является неравновесной, если в ней существуют потоки вещества, энергии, импульса. В такой системе существует производство энтропии. Степень

неравновесности, например, газа, определяется отклонением его состояния от равновесного Максвелловского распределения частиц. В любом неравновесном состоянии энтропия меньше ее равновесного значения [13]. Для неравновесной системы также приемлемо понятие локального равновесия, если каждая физическая точка является равновесной. В этом случае система представима совокупностью равновесных подсистем.

Определим понятие стационарности системы. Здесь будем называть систему стационарной, если во всех ее точках значения параметров системы не зависят от времени. Стационарное состояние замкнутой системы может быть только равновесным. В равновесных системах нет потоков энергии и вещества, нет производства энтропии, поэтому их состояние определяется минимальным количеством параметров. В частности, состояние равновесного идеального газа полностью определяется энергией. Именно эти обстоятельства позволили использовать очень мощный и изящный гамильтонов формализм классической механики, развитый для консервативных систем. Следует помнить, что данный формализм справедлив для моделей систем, состоящих из потенциально взаимодействующих материальных точек при условии потенциальности всех коллективных сил в системах. Т.е. применим к описанию необратимых процессов в природе.

Неравновесная система стационарна, если пространственное распределение ее параметров не меняется со временем. Из-за диссипативных процессов ее стационарность возможна только при наличии внешних стационарных источников энергии, импульса, негэнтропии. Т.е. неравновесная система может быть стационарной только при условиях ее открытости и баланса всех параметров. В неравновесных системах условие потенциальности коллективных сил нарушается, что ограничивает возможности использования формализма Гамильтона для описания таких систем.

Для описания достаточно слабых возмущений в стационарной неравновесной системе, справедлива линеаризация. В этом случае можно использовать адиабатическое приближение. Это связано с тем, что изменения производства энтропии, обусловленные возмущениями параметров системы, определяются квадратичными членами по величине возмущения. Именно это приводит к успешному использованию формализма Гамильтона даже в неравновесных системах, если, конечно, они стационарны и если возмущения системы невелики. К примеру, атмосфера Земли является неравновесной [2]. Тем не менее, для описания в ней динамических процессов, вызванных достаточно слабыми

источниками возмущений, с успехом используются линеаризованные уравнения газовой динамики. Эти уравнения можно получить на основе термодинамики и формализма Гамильтона, применимого для изучения бездиссипативной сплошной среды, то есть в адиабатическом приближении [5,19].

Как строить уравнения системы газ-радиация

Для метеорологических целей, как правило, сегодня используются уравнения газодинамики атмосферы, в которых поток радиации рассчитывается, опираясь на заданную модель пространственно-временной структуры атмосферы при заданных коэффициентах поглощения [23]. Пространственно-временная модель атмосферы, в свою очередь, определяется с помощью уравнений газодинамики [5]. Но такое построение модели атмосферы имеет ряд недостатков. Прежде всего, здесь учет влияния радиации на газ выполняется только с помощью правой части уравнения энергии. В остальных уравнениях динамики газа, а также в его параметрах, влияние радиации не учитывается. В некоторых случаях это вносит серьезные искажения. К примеру, в области ионосферы состав газа, определяемый процессами фотоионизации, существенно зависит от меняющего его потока солнечной радиации. Все эти, а также и другие не менее важные обстоятельства, служат основанием развития уравнений системы газ-радиация.

Минимальные изменения системы уравнений неравновесной термодинамики для описания эволюционных процессов в атмосфере, обусловленных потоком солнечной радиации, должны состоять в учете взаимозависимости потока солнечной радиации и состоянием атмосферного газа. В такой системе потоки солнечной радиации и параметры атмосферного газа являются самосогласованными определяющими параметрами. Аналогом самосогласованной системы уравнений может служить плазма в электромагнитном поле. Такая система называется уравнениями Власова [16]. Аналогичная система уравнений должна быть построена и для атмосферы. Она позволит в заданной точке атмосферы учитывать зависимость не только потока радиации от значений параметров атмосферы, но и зависимость параметров газа от потока солнечной радиации.

На первых шагах создания такой системы уравнений, позволяющей изучать динамические процессы в неравновесной атмосфере, можно использовать уравнения неравновесной термодинамики [13]. В основе неравновесной термодинамики лежат уравнения, определяющие изменения массы, импульса, механической энергии, внутренней энергии и энтропии (уравнения баланса)

атмосферного газа в потоке солнечной радиации. Но чтобы эти уравнения использовать для построения эволюционной модели атмосферы, их нужно модифицировать с учетом характера обмена энергией между газом и радиацией. Причем надо иметь в виду, что эту систему уравнений следует модифицировать для нестационарного случая. Дело в том, что обычно предполагается, что вся поступающая в атмосферу солнечная радиация идет на производство энтропии [2, 9]. На самом деле это верно не всегда. Действительно, часть энергии солнечной радиации преобразуется в различные составляющие энергии атмосферы, которые могут возвращаться. Иногда эту энергию называют скрытой или латентной. Например, в дневное время в результате ионизации газа часть энергии накапливается в виде плазменной компоненты. В ночное время эта энергия в результате рекомбинации затем выделяется, что обеспечивает взаимосвязь дневных и ночных динамических характеристик атмосферы. Если же считать, что вся поглощаемая солнечная радиация идет на производство энтропии, возможность учета такой взаимосвязи исчезает.

Уравнения баланса массы. Покажем, как опираясь на классические уравнения неравновесной термодинамики [14, 18], можно построить систему уравнений для неравновесной атмосферы. Начнем с уравнения баланса для плотности атмосферы.

Атмосферный газ является многокомпонентным. Баланс между различными компонентами определяется фотохимическими реакциями. Пусть газ состоит из m фотохимических компонентов с парциальными плотностями ρ_α , $\rho = \sum_{\alpha=1}^m \rho_\alpha$ – полная плотность газа. Уравнение непрерывности для плотности ρ_α с учетом процессов фотоионизации и рекомбинации можно получить, приняв во внимание изменение массы соответствующей компоненты вследствие фотохимических реакций. Оно имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_\alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_\alpha u_\alpha) + M_\alpha (v_\alpha J_\alpha - \gamma_\alpha N_\alpha^2) \quad (1)$$

где $J_\alpha = I_\alpha (N_\alpha^0 - N_\alpha)$ – скорость фотоионизации, т. е. число актов реакции, отнесенное к единице объема и единице времени, I_α – интенсивность солнечной радиации, определяющая фотоионизацию α компонента, γ_α – коэффициент фоторекомбинации, N_α^0 – количество α – й компоненты нейтральной составляющей ионизируемого газа в единице объема.

Из условия сохранения массы следует, что $\sum_{\alpha=1}^m M_{\alpha} (v_{\alpha} J_{\alpha} - \gamma_{\alpha} N_{\alpha}^2) = 0$ (а). Хотя условие (а) является упрощенным, оно позволяет на качественном уровне учитывать процессы фотоионизации.

Введем локальную скорость центра масс $u = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} u_{\alpha} / \rho$ и локальные скорости

диффузии каждого компонента, $W_{\alpha} = u_{\alpha} - u$ а также диффузионные потоки, $W_{\alpha} = \rho_{\alpha} W_{\alpha}$ удовлетворяющие условию $\sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} = 0$.

Суммируя уравнения (1) по всем компонентам, получим вследствие (а) для полной плотности атмосферного газа обычное уравнение непрерывности.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho u)$$

Уравнение изменения импульса в атмосфере. Уравнение, описывающее изменение полного импульса единицы объема, можно записать так:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k + P \delta_{ik} - \Pi_{ik}) + \sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} F_{\alpha i} \quad (2)$$

где $F_{\alpha i}$ – сила, действующая на единицу массы α – го компонента

Естественная интерпретация соотношения (2) заключается в том, что помимо конвективного потока импульса с проекциями $\rho u_i u_k$ существует „вязкий» поток импульса $P \delta_{ik} - \Pi_{ik}$, связанный не с упорядоченным движением газа (конвекцией), а с хаотическим тепловым движением. Это движение приводит также к втеканию и вытеканию импульса через границы объема V и характеризуется значениями тензора на границе объема V .

Источником полного импульса является полная внешняя сила. $\sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} \vec{F}_{\alpha i}$

Для нейтральной атмосферы основными силами являются силы тяжести и давления. Сила тяжести обуславливает гравитационные волны, а давление – акустические.

В ионосфере существенную роль играют ионизованные компоненты атмосферного газа. Поэтому в ней появляются силы связанные с наличием электрического и магнитного полей. Эти силы можно написать так:

$$\vec{F}_i = \rho_i \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{j}_i \vec{B}] \quad (3)$$

где \vec{B} – внешнее магнитное поле, \vec{E} – электрическое поле, ρ_i – плотность зарядов для i -й компоненты заряда, \vec{j}_i – ионосферный ток.

Первый член в выражении для силы обусловлен внешними электрическими полями. Обычно этот член значительный в области экватора и на полюсах. В средних широтах электромагнитные силы, главным образом, обусловлены наличием магнитного поля. Выражение для тока на ионосферных высотах, начиная с 200 км, имеет вид [19]:

$$\vec{j} = \sigma_e \{ \vec{h}[(\vec{E}\vec{h}) + (\nabla p_e \vec{h} / (eN))] + \frac{v_e v_{in}}{\omega_e \omega_i} (\vec{E} + \frac{\nabla p_e}{eN}) - \frac{v_e v_{in}^2}{\omega_e \omega_i^2} [[\vec{E}\vec{h}] + \frac{[\nabla p_e \times \vec{h}]}{eN}] \} \quad (4)$$

где v_{in} – характерная частота столкновений ионов с нейтральной компонентой газа \vec{h} – единичный вектор магнитного поля земли \vec{v} – скорость заряженной компоненты $\vec{v}_p = \nabla p_e / (eN |\vec{B}|)$, p_e – давление электронного газа, e – заряд электрона, \vec{B} – напряженность магнитного поля N – электронная концентрация ω_e, ω_i – гирочастоты электронов и ионов соответственно, $\sigma_e = \frac{e^2 N}{m_e v_e}$ – электронная проводимость m_e – масса электрона v_e – частота столкновений электрона с нейтральными частицами.

Отсюда для атмосферы, выше 300 км для электромагнитных сил можно приближенно написать:

$$\vec{F}_i = \rho_i \vec{E} + [\vec{j}_i \vec{B}] \approx \rho_i v_{in} \{ \vec{h}(\vec{v}\vec{h}) - \vec{v} + [\vec{v}_p \times \vec{h}] \} \quad (5)$$

Согласно (5), силы в первом приближении, обусловленные движением электронного газа в магнитном поле Земли пропорциональны электронной концентрации.

Помимо магнитогидродинамических сил в ионосферной плазме существуют силы ионного трения, обусловленные столкновениями ионов и электронов с нейтральными частицами. Эти силы имеют вид: $F_i = m_i v_{ij} (u_i - u_j)$. Здесь m_i – масса i -компоненты газа, v_{ij} – частота столкновений i и j – компонент ионосферной плазмы u_i и u_j – соответствующие скорости.

Уравнение энергии атмосферы. Энергию атмосферы целесообразно разбить на три части. Это кинетическая, потенциальная и внутренняя энергии единичного объема атмосферы. Уравнение для баланса кинетической энергии имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho u^2}{2} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\rho u^2 u_k}{2} + (P\delta_{ik} - \Pi_{ik}) u_i \right] + (P\delta_{ik} - \Pi_{ik}) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \sum_{\alpha=1}^m \rho_\alpha F_\alpha u \quad (6)$$

Такая форма записи уравнения баланса кинетической энергии основана на физической гипотезе о том, что помимо конвективного потока $\rho u^2 u/2$ на границе объема существует «вязкий» поток кинетической энергии с проекциями, $(P\delta_{ik} - \Pi_{ik})u_i$ а источниками кинетической энергии помимо работы внешних сил являются работы сил $\sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} F_{\alpha} u$ давления и вязкого трения (второй член в правой части (6)).

Рассмотрим уравнение баланса потенциальной энергии.

Из формулы $\rho\psi = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha}\psi_{\alpha}$ (ψ_{α} – потенциальная энергия α –го компонента, отнесенная к единице массы) имеем, используя (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\psi) = \sum_{\alpha=1}^m \psi_{\alpha} \frac{\partial \rho_{\alpha}}{\partial t} = -\sum_{\alpha=1}^m \psi_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_{\alpha} u_{\alpha i}) + \sum_{\alpha} \psi_{\alpha} M_{\alpha} (v_{\alpha} J_{\alpha} - \gamma_{\alpha} N_{\alpha}^2) \quad (7)$$

Пользуясь формулой $F_{\alpha i} = -d\psi_{\alpha}/dx_i$ и выделяя конвективный поток $\rho\psi u$, первое слагаемое правой части уравнения (7) преобразуем следующим образом:

$$\sum_{\alpha=1}^m \psi_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_{\alpha} u_{\alpha i}) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\sum_{\alpha=1}^m \psi_{\alpha} \rho_{\alpha} u_{\alpha i}) + \sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} F_{\alpha i} u_{\alpha i} = \nabla(\rho\psi u + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha}\psi_{\alpha}) + \sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} F_{\alpha} u + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} F_{\alpha}$$

В результате уравнение (7) принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\psi) = -\nabla(\rho\psi u + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha}\psi_{\alpha}) - \sum_{\alpha=1}^m \rho_{\alpha} F_{\alpha} u - \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} F_{\alpha} + \sum_{\alpha} \psi_{\alpha} M_{\alpha} (v_{\alpha} J_{\alpha} - \gamma_{\alpha} N_{\alpha}^2) \quad (8)$$

Из (9) следует, что поток потенциальной энергии содержит кроме конвективного $\rho\psi u$ диффузионный поток $\sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} F_{\alpha}$

Баланс полной механической энергии единицы объема $\rho E = \rho(u^2/2 + \psi)$ определяется суммированием уравнений (6) и (8):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \{[(\rho E + P)\delta_{ik} - \Pi_{ik}]u_i + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha}\psi_{\alpha}\} + (P\delta_{ik} - \Pi_{ik}) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} F_{\alpha} + \sum_{\alpha} \psi_{\alpha} M_{\alpha} (v_{\alpha} J_{\alpha} - \gamma_{\alpha} N_{\alpha}^2) \quad (9)$$

Запишем уравнение баланса для плотности внутренней энергии, определив ее как третью составляющую полной плотности $\rho\tilde{U}$ энергии $\rho E_i = \frac{\rho u^2}{2} + \rho\psi + \rho\tilde{U} = \rho(E + \tilde{U})$.

Источником полной энергии атмосферного газа является солнечная радиация. Кроме того, здесь необходимо учесть радиационное выхолаживание атмосферы. Поэтому уравнение баланса полной энергии будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E_i) = -\nabla(\rho E_i u + J_{E_i}) + \Phi_S \quad (10)$$

где неконвективный поток J_{E_i} равен: $J_{E_i} = (P\delta_{ik} - \Pi_{ik})u_k + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} M_{\alpha} + L_i$.

Неконвективный поток J_{E_i} состоит из „вязкого» потока, диффузионного потока потенциальной энергии и теплового потока (первое, второе и третье слагаемые правой части J_{E_i} соответственно). Это выражение можно рассматривать как феноменологическое определение теплового потока L_i . Вклад радиационного излучения в баланс энергии атмосферы определяется величиной Φ_S . В приближении стационарности атмосферы уравнение баланса для внутренней энергии получается путем вычитания выражение (9) из (10) и учитывая выражение для J_{E_i} получим:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{U}) = -\nabla(\rho \tilde{U}u + L) - (P\delta_{ik} - \Pi_{ik}) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \sum_{\alpha=1}^m W_{\alpha} F_{\alpha} + \Phi_S \quad (11)$$

Видим, что кроме конвективного потока внутренней энергии существует тепловой поток L , а плотность источников внутренней энергии помимо работы вязких сил и сил давления содержит диффузионное слагаемое $\sum_{\alpha} W_{\alpha} F_{\alpha}$. Разделение правой части уравнения баланса на «поток» и «источник» неоднозначно. В частности, в уравнении (11) второе слагаемое правой части можно преобразовать следующим образом

$$-(P\delta_{ik} - \Pi_{ik}) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = - \frac{\partial}{\partial x_k} [(P\delta_{ik} - \Pi_{ik})u_i] + u_i \frac{\partial}{\partial x_k} [(P\delta_{ik} - \Pi_{ik})]$$

и включить слагаемое $(P\delta_{ik} - \Pi_{ik})u_i$ в неконвективный поток. То, что уравнение баланса для внутренней энергии записывается в форме (11), объясняется физической гипотезой, согласно которой сила вязкого трения и силы давления обуславливают перенос механической энергии упорядоченного движения газа, а не перенос энергии хаотического теплового движения.

Уравнение энтропии. Рассмотрим уравнения для энтропии. Будем при этом руководствоваться предположением о существовании локального равновесия. Согласно этому предположению локальная молярная энтропия определяется термодинамическим равенством

$$d\tilde{S} = (d\tilde{U} + Pd\tilde{V})/T + dS_S \quad (12)$$

где dS_S -прирост энтропии, обусловленный потоками радиации

Допустим, что (12) остается справедливым вдоль траектории центра масс малого объема газа. Умножая обе части уравнения (12) на ρ , заменяя $\tilde{V} = \rho^{-1}$ и

переходя к субстанциональной производной по времени, получим:

$$P \frac{d\tilde{S}}{dt} = T^{-1} \left[\rho \frac{d\tilde{U}}{dt} - P \rho^{-1} \frac{d\rho}{dt} \right] + P \sigma_s \quad (13)$$

где $P \sigma_s$ -производство энтропии, обусловленное потоками радиации [2, 9].

Выполняя в (13) соответствующие операции, придем к выражению [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S) = -\nabla[\rho S u + (L - \sum_{\alpha=1}^m M_{\alpha} J_{\alpha} / T) + L \nabla(T^{-1}) + T^{-1} \sum_{\alpha=1}^m I_{\alpha} F_{\alpha}] + T^{-1} \Pi_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \sigma_s \quad (14)$$

Интерпретация уравнения (14) очевидна: помимо конвективного потока энтропии существуют тепловой поток, а плотность источников энтропии определяется формулой

$$\sigma = L \nabla(T^{-1}) - \sum_{\alpha=1}^m I_{\alpha} \left[-\frac{F_{\alpha}}{T} \right] + T^{-1} \Pi_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \sigma_s \quad (15)$$

Следовательно, производство энтропии в атмосфере вызывается такими видами необратимых процессов — теплопроводностью, обусловленной существованием градиента температуры (слагаемое $L \nabla(T^{-1})$), диффузией, вызванной наличием внешних сил, градиентов температуры (второе слагаемое в формуле (15)), вязкостью, вызванной наличием градиентов скорости (слагаемое $T^{-1} \Pi_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$), а также ее притоку вместе с солнечной радиацией. Выражение (15) билинейно: в каждое слагаемое входит множитель типа потока (тепловой поток L , диффузионный поток I_{α} , поток импульса или тензор вязкости Π_{ik} и скорость химической реакции J_j) и множитель, пропорциональный градиенту некоторой величины — температуры, потенциальной энергии (сила F_{α}), скорости.

Солнечная радиация. Как правило, приток солнечной энергии в атмосферу относят к внутренней составляющей ее энергии, которая определяет прирост энтропии. Но следует помнить, что это справедливо только в стационарном случае, когда выполняется равенство приходящей солнечной энергии и уходящего теплового излучения Земли. Такой баланс приближенно соблюдается только за достаточно большой период усреднения, сопоставимый с периодами солнечной активности. На самом деле не существует такого момента времени, когда данный баланс имеет место. Поэтому встает вопрос о том, к какой категории энергии атмосферного газа следует отнести энергию радиации. Действительно, солнечная энергия приводит к усилению динамических процессов в атмосфере, как это имеет место для СТ. Она изменяет потенциальную энергию атмосферы за счет изменения

температуры атмосферы в поле тяжести и за счет изменения химического состава газа. Она также меняет внутреннюю энергию из-за нагрева атмосферы в результате различных диссипативных процессов. Более того, она запасается в различных неорганических и органических системах. Ниже рассмотрим самый простой стационарный случай, когда солнечная радиация изменяет энтропию атмосферы. Как показал Планк [9], радиация обладает не только энергией, но и энтропией и температурой. Плотность энтропии пучка фотонов частоты ν и интенсивности I_ν равна:

$$s_\nu = \frac{2k\nu^2}{c^3} [(1+y) \ln(1+y) - y \ln y] \quad (16)$$

а их температура

$$T_\nu^{-1} = \frac{k}{h\nu} \ln\left(1 + \frac{1}{y}\right) \quad (17)$$

где $y = c^2 I_\nu / 2h\nu^3$. Формулы (16), (17) можно получить, рассматривая фотоны, как частицы, подчиняющиеся статистике Бозе – Эйнштейна [13].

Потоки энергии и энтропии радиации через единичную площадку (f_r и f_s) получаются интегрированием I_ν и cs_ν по частоте и телесному углу

$$f_r = \iint I_\nu \Omega d\Omega d\nu \quad (18)$$

$$f_s = \iint cs_\nu \Omega d\Omega d\nu \quad (19)$$

где Ω - единичный вектор, направленный по лучу, $d\Omega$ - дифференциал телесного угла. Дифференцируя (16) по времени t и координатам r , получаем [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu} \frac{\partial I_\nu}{\partial t}, \quad \Omega \cdot \nabla (cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu} \Omega \cdot \nabla I_\nu \quad (20)$$

Отсюда следует, что уравнение переноса энтропии радиации просто связано с обычным уравнением переноса радиации

$$\frac{1}{c} \frac{\partial s_\nu}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla (cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I_\nu \right) = \frac{1}{T_\nu} [B_\nu \chi_a - I_\nu (\chi_a + \chi_s)], \quad (21)$$

где χ_a и χ_s - коэффициенты поглощения и рассеяния фотонов, B_ν - функция

излучения Планка; из-за наличия множителя $1/c$ производные по t в (13), как правило, пренебрежительно малы

В частном случае, если радиация испускается абсолютно черным телом (при этом $T_v = T_r$ постоянная), из (18), (19) следует, что она несет в полупространстве поток энергии:

$$f_r = \sigma_B T_r^4 \quad (22)$$

(где σ_B – постоянная Стефана-Больцмана) и поток энтропии

$$f_s = \frac{4}{3} \sigma_B T_r^3 = \frac{4 f_e}{3 T_r} \quad (23)$$

В неравновесной системе, содержащей вещество и радиацию при различных температурах (например, молекулы атмосферы и солнечные фотоны), плотности энтропии, ее потоки и производства энтропии вещества (величины с индексами m) и фотонов (с индексами r) складываются [12]

$$S = S_m + S_r; \quad J(S) = J(S_m) + J(S_r); \quad \sigma = \sigma_m + \sigma_r.$$

При взаимодействии фотонов с частицами (поглощении и рассеянии) производство энтропии в единице объема равняется [13]

$$\sigma_r = \int -div(\Omega I_v)(1/T - 1/T_v) d\Omega dv. \quad (24)$$

Для изучения черного тела из (24) получается

$$\sigma_r = -div f_r (1/T - 4/(3T_v)). \quad (25)$$

В (24), (25) первые члены описывают изменение энтропии вещества, а вторые – фотонов. Тот факт, что даже для наиболее неравновесного состояния материи – потока фотонов – энтропия зависит от тех же параметров, что и энтропия вещества, $S(E, T, V)$ (с учетом того, что химический потенциал фотонов $\mu = 0$) [9] подтверждает справедливость обобщения приведенных формул для радиации на неравновесные состояния.

Подытожим свойства энтропии, определяющие ее ведущую роль в неравновесных системах. Прежде всего, это единственная функция состояния, которая различается в необратимых и обратимых процессах: в-первых, она растет, а во-вторых, не меняется. При этом рост энтропии в совокупности необратимых процессов определяет направление течения времени («стрелу времени» [20]). Кроме того, энтропия является мерой неупорядоченности макросостояния, которое может реализоваться через различные комбинации микросостояний,

поэтому ее уменьшение может служить мерой упорядоченности, а увеличение – мерой разупорядочения системы. Наконец, энтропия выражает качество энергии. Если атмосфера получает поток фотонов с более высокой температурой, чем температура ее теплового излучения, то при этом негэнтропия увеличивается. Т.е. увеличивается порядок в атмосфере. Возникают неравновесные структуры.

Существует мнение, что, так как энтропия системы не сохраняется, она играет второстепенную роль по сравнению с энергией. Однако, то что энтропия в отличие от энергии не является сохраняющейся величиной, не снижает ее важности, как параметра, характеризующего эволюцию систем. Ее увеличение или уменьшение указывает на характер происходящих в системе процессов (упорядочение или разупорядочение), а величина ее изменения может служить их мерой. Ведь всегда, когда говорят, что расходуется энергия, в действительности расходуется негэнтропия, а энергия приходит и уходит, только в разных формах.

Проблемы и перспективы развития физики неравновесной атмосферы

В целом, приведенная совокупность уравнений неравновесной термодинамики, позволяет изучать динамику атмосфера, как открытой неравновесной системы газ-радиация. Но чтобы воспользоваться этими уравнениями, необходимо знание различных коэффициентов, таких, как теплопроводность, коэффициент поглощения солнечной радиации, коэффициентов фотохимических реакций и т.д. Сами эти коэффициенты, как правило, могут быть получены только на основании знаний микропроцессов, свойств взаимодействий вещества и радиации и т.п. Более того, как коэффициенты, так и свойства взаимодействия определяются состоянием системы. Поэтому при построении эволюционной модели атмосферы возникают проблемы, связанные с отсутствием достаточно строгих физических теорий, позволяющих находить эти коэффициенты, а также коллективные параметры, определяющие различные типы взаимодействий. Таким образом, хотя развитые в настоящее время физические теории позволили понять широкий круг явлений и процессов в атмосфере, они не могут дать ответа на многие вопросы, ответы на которые необходимы, чтобы приблизиться к пониманию физической природы возникновения и эволюции атмосферы.

Одна из ключевых проблем всей современной физики, вставшая на пути понимания физики эволюции, связана с ограничениями классической физики, при которых она была построена. Это требование консервативности системы. Оно привело к известной проблеме необратимости. Суть проблемы заключается в том,

что современные физические теории, построенные в рамках консервативности систем, не способны объяснять эволюционные явления в природе, связанная с диссипативностью реальных процессов [20]. А сегодня наука подошла к той черте, когда для решения возникших геофизических проблем требуются теории, позволяющие описывать эволюцию систем с учетом их неравновесности, открытости и структурности. И пока не будут созданы такие теории, вряд ли удастся преодолеть эти трудности и продвинуться дальше в понимании процессов эволюции, в частности, в решении проблемы изменения климата.

Одним из главных препятствий на пути к таким теориям было противоречие между обратимостью динамики описываемых физикой систем и необратимостью реальных природных процессов. Первым, кто столкнулся с этой проблемой, был Больцман. Он попытался в рамках законов Ньютона описать необратимый процесс установления равновесия в газах. Но, как и многочисленные его последователи, ему не удалось достичь поставленной цели. Только в последние годы удалось предложить решение проблемы необратимости в рамках законов Ньютона [18, 21]. Как оказалось, это решение, открывающее путь к построению физики эволюции [15], стало возможным благодаря найденному пути построения механики систем, позволяющему отказаться от принципиальных ограничений, при которых строилась классическая механика для материальной точки. Сущность этого пути построения механики систем состоит в замене материальных точек, для которых была построена механика Ньютона, на системы таких материальных точек. При этом уравнения динамики таких систем строятся на выражения для энергии системы при условии выполнения законов Ньютона для материальных точек и в представлении энергии в виде суммы ее энергии движения и внутренней энергии. В результате было получено уравнение движения системы, которое имеет вид [21]:

$$M_N \dot{V}_N = -F^{env} - \alpha_N V_N \quad (26)$$

где α_N – коэффициент, определяемый изменением внутренней энергии системы, M_N – масса системы, V_N – скорость центра масс системы, F^{env} – результирующая сила, приложенная к центру масс системы. Первый член в правой части (26) это потенциальная сила, меняющая кинетическую энергию системы. Второй член определяет изменение ее внутренней энергии. Из уравнения (26) вытекает уравнение движения Ньютона для материальной точки. Так как система равновесна, то ее динамика будет определяться внутренней энергией и не должна

зависеть от хаотического движения элементов системы.

Используя уравнение движения системы, можно получить обобщенные уравнения Лагранжа, Гамильтона, которые описывают процессы диссипации в неравновесных системах. С помощью обобщенного уравнения Гамильтона выводится обобщенное уравнение Лиувилля. Оно имеет вид [21]:

$$df/dt = -f \sum_{L=1}^R \partial F_L / \partial V_L \quad (27)$$

Здесь f функция распределения равновесных подсистем, на которые разбивается неравновесная системы, $L = 1, 2, 3, \dots, R$ - число подсистем, F_L - не потенциальная часть коллективных сил, действующих на подсистемы, V_L - скорость L подсистемы.

Обобщенное уравнение Лиувилля (27) получено в рамках законов классической механики, но без использования требования голономности связей, эквивалентное требованию консервативности систем. Это требование приводит к канонической форме уравнения Лиувилля, в которой правая часть равна нулю. Отличие правой части обобщенного уравнения Лиувилля от нуля связано с учетом диссипативных процессов в неравновесной системе, которые обуславливают установление равновесия. Этот учет стал возможным благодаря тому, что это уравнение выводилось на основе уравнений движения систем, обладающих внутренней энергией. Оказалось, что сам процесс установления в системах, какой в частности является атмосфера Земли, связан с трансформации энергии коллективного движения во внутреннюю энергию подсистем, которая эквивалентна тепловой энергии атмосферы.

Поскольку увеличение внутренней энергии происходит за счет доли энергии солнечной энергии и упорядоченного движения атмосферы, и поскольку внутренняя энергия не совершает работы по коллективному перемещению элементов газа, то ее относительно изменению можно поставить в соответствие энтропию [18, 21]:

$$\Delta S = \sum_{L=1}^R \left\{ N_L \sum_{k=1}^{N_L} \left[\sum_s F_{ks}^L v_k dt \right] / E_L \right\} \quad (28)$$

E_L - внутренняя энергия подсистемы; s - внешние элементы газа относительно элементов L - подсистемы, взаимодействующие с ее k -ми элементами; F_{ks}^L - сила, действующая на k -й элемент подсистемы со стороны s -ого элемента другой подсистемы; V_k - скорость k -го элемента.

Формула (28) в отличие от всех предшествующих формул, определяющих

энтропию газа, вытекает непосредственно из механики Ньютона без использования каких-либо вероятностных гипотез и закономерностей. Тем самым термодинамика, многие статистические закономерности в кинетике, находят свое объяснение в рамках строгих физических законов. Это открывает путь к построению физики эволюции, описывающей открытые неравновесные системы, а затем и к построению динамической модели открытой неравновесной атмосферы.

Заключение

К настоящему времени развиты теории, позволяющие в термодинамическом пределе моделировать динамические процессы в атмосфере, обусловленные пространственно-временными изменениями потока солнечной радиации. Эти теории развиты для приливов в атмосфере, для генерации волновых возмущений атмосферы солнечным терминатором, во время затмений и т.п. При существующих мощностях вычислительной техники дальнейшее развитие исследований динамических процессов в атмосфере, решение проблем изменения климата, и т.п. сталкиваются с необходимостью использования более точных, чем используемые сегодня исходных уравнений, описывающих открытость и неравновесность атмосферы. Для этого атмосферу следует рассматривать как самосогласованную систему газ-радиация. Действительно, нам удалось обнаружить, что нелинейное взаимодействие солнечной радиации и атмосферного газа приводит к сдвигу спектра акустико-гравитационных волн, который существенно зависит от степени освещенности атмосферы [12, 18]. Этот сдвиг невозможно получить в рамках линеаризованных уравнений в пределах термодинамического приближения модели атмосферы.

Для изучения атмосферы, как открытой системы газ-радиация, на начальной стадии исследований можно использовать методы неравновесной динамики. Чтобы учитывать эффекты фотоионизации и рекомбинации, многокомпонентность атмосферы, зависимость ее пространственно-временного состава от освещенности и т.п., их требуется модифицировать. Полученные в результате модификации уравнения позволяют рассчитывать систему газ-радиация с учетом потоков переноса энергии и вещества при изменениях внешних факторов. Они также позволяют оценивать роль нелинейной взаимосвязи радиации и атмосферного газа.

Уравнения неравновесной термодинамики являются приближенными.

Они применимы до тех пор, пока атмосфера является локально равновесной, т.е. в каждой ее физической точке можно определить температуру, давление и плотность. Они неприменимы для описания быстропротекающих переходных процессов, в сильно разреженных средах, в системах далеких от равновесия. Такие случаи имеют место в турбулентных средах, высоких слоях атмосферы, областях резких изменений параметров среды, например, в области солнечного терминатора. Другим недостатком неравновесной термодинамики является использование большого количества коэффициентов, определяющих взаимосвязь состояния атмосферы и пронизывающей ее радиации. Дело в том, что сами эти коэффициенты в той или иной степени являются функциями состояния системы, которые существенно меняются в сильно неравновесных средах. Для устранения всех этих недостатков возникает необходимость в развитии такого математического аппарата, который дает возможность исследовать атмосферу как систему газ-радиация, начиная от микроуровней, на которых происходят фотохимические процессы, процессы поглощения радиации и т.п., и кончая макроуровнями, которые определяют наблюдаемую динамическую структуру атмосферы. Этот аппарат можно создать на основе расширенного формализма классической механики [21]. Для этого потребуются знания основных законов и принципов эволюции открытых систем, понимание того, как на основе свойств структурных элементов системы определяют свойства самой системы при существующих внешних ограничениях. Без этого невозможно понять такую сложную систему, как атмосфера Земли.

Решение ключевой проблемы физики – проблемы необратимости, позволяет существенно расширить область применения классической механики и создать математический аппарат, который способен описывать сильнонеравновесные диссипативные системы, конструировать сложные неравновесные системы, начиная от микро-уровня и кончая макропроцессами. Открываются перспективы для развития физики эволюции. Эту физику, в отличие от существующей обратимой физики, можно использовать для создания эволюционных моделей сложных открытых систем. К настоящему времени для этого уже получены обобщенные уравнения, которые в отличие от своих канонических аналогов, дают возможность описывать диссипативные процессы эволюции. Эти уравнения позволяют обосновать термодинамику, кинетику, определить области их использования и, тем самым, расширить эти области для расчетов коэффициентов, используемых, например, в неравновесной термодинамике.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Развитие методов исследований неравновесной атмосферы»

Литература

1. *Anthes R.A., Panofsky H.A., Cahir J.J., Rango A.* The atmosphere. 2nd edition Meteorology// Columbus Toronto London Sydney –1978.
2. *Essex C.* Radiation and Irreversible Thermodynamics of Climate// Journal of the atmospheric Science. –1984. – Vol.41, № 12. –P. 1985-1991;
3. *Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В.* Динамические модели свободной атмосферы//И-ск. Наука, СОРАН. –1987. –292 с.
4. *Дикий Л.А.* Теория колебаний земной атмосферы// Л., Гидрометиздат.–1969.–195 с.
5. *Госсард Э.Э., Хук У.Х.* Волны в атмосфере//М., 1978, 532 с.
6. *Obama.* Administration Calls for More Action on Climate Change//EOS. –2013. – Vol. 94, № 8. –P. 78.
7. *Сомсиков В.М.* Переходные процессы в атмосфере Земли, обусловленные солнечным терминатором//Докторская диссертация, Алма-Ата. –1988. –251 с.
8. *Somsikov V.M.* Solar Terminator and Dynamic Phenomena in the Atmosphere: A Review// Geomagnetizm i Aeronomiya. –2011. –Vol. 51. –P. 707–719.
9. *Изаков М.Н.* Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах//УФН. –1997. – Т. 167, № 10. –С. 1087-1094.
10. *Голицын Г.С., Мохов И.И.* Об устойчивости и экстремальных свойствах моделей климата// Физика атмосферы и океана. –1978. –Т.14, № 4. –С. 378-387.
11. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И.* Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности//Оптика атмосферы и океана. –2004. –Т.17, № 12. –С. 1003-1017.
12. *Сомсиков В.М., Дунгенбаева К.Е., Гангули Б.* Акустико-гравитационные волны в неравновесной атмосфере// Геомagnetизм и аэрoномия.–2004. –Т 4, № 3. –С. 407-411.
13. *Antonova V.P., Dungenbaeva K.E, Zalizovskii A.V., Inchin A.S., Kryukov S.V., Somsikov V.M, Yampol'skii Yu. M.* Difference between the spectra of Acoustic Gravity Waves in Daytime and Nighttime Hours due to Nonequilibrium Effects in the atmosphere// Geomagnetism and Aeronomy. –2006. –Vol. 46, № 1. –P. 101-109.
14. *Rumer Yu.B., Ryvkin M.Sh.* Thermodynamics. Stat. Physics and Kinematics//М. – 1977. –125 p.
15. *Сомсиков В.М.* К началам физики эволюции// Журнал ПЭОС. –2006. –Т.2, Вып. 8. –С. 29-39.
16. *Сомсиков В.М.* Что дает решение проблемы необратимости// Журнал ПЭОС. –2009. –Т.1, Вып. 11. –С. 4-20.
17. *Власов А. А.* Макроскопическая электродинамика//2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ. –2005. –240с.
18. *Сомсиков В.М.* Неравновесная атмосфера, как система газ-радиация //

Известия НАН РК, серия физико-математическая. –2010, № 4. –С.148-154.

19. *Гершман Б.Н.* Динамика ионосферной плазмы//М., Наука. –1974. –256 с.

20. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного//М, Мир. – 1990. –342 с;

21. *Somsikov V. M.* Principles of Creating of the Structured Particles Mechanics// Journal of material Sciences and Engineering. –2011, A(1). –P. 731-740.

22. *Архипов Ю.В., Гангули Б., Намвар Р., Сомсиков В.М.* Влияние солнечной радиации на спектр колебаний атмосферы// Геомагнетизм и аэрномия. –1999. –Т.39, № 4. –С.108-112.

23. *Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В.* Динамические модели свободной атмосферы//Новосибирск. Наука. –1987. –292с.

24. *Josefino C. Comiso and Claire L. Parkinson.* Satellite-Observed changes in the Arctic// Physics Today. – August 2004. – Vol. 57, № 8. –P. 38-44.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ – ОТКРЫТОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЕ

Сомсиков В.М., Нұрғалиева Қ.Е., Нурмуханбетова К.Ж.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Выявлены особенности спектров волновых возмущений верхней атмосферы в переходные часы суток для различных сезонов, обусловленные изменением интенсивности поступающего в атмосферу потока радиации. Показано, что в дневное время в спектре возмущений появляются более высокочастотные гармоники по сравнению с ночными часами, что можно рассматривать как дополнительное подтверждение влияния радиации на спектр собственных колебаний атмосферы.

Область применения результатов: атмосфера, науки о Земле

Ключевые слова: АТМОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, НАРАВНОВЕСНЫЕ СИСТЕМЫ, ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Әр түрлі маусымдар үшін тәуліктің өтпелі сағаттарындағы жоғарғы атмосферадағы толқындық ауытқудың спектрлік ерекшеліктері, радиациялық ағынның атмосфераға мерзімді қарқынды өзгерістермен түсетін ерекшеліктері анықталды. Күндізгі уақыттағы жоғары жиілікті гармоникалық спектрлік ауытқуды анықтау түнгі сағаттармен салыстырғанда анық көрінетіні көрсетілген, атмосфералық меншікті спектрлік тербелістерде радиациялық әсер етуді растауды қосымша ретінде қарастыруға болады.

Нәтижелерді қолдану аумағы: атмосфера, Жер туралы ғылымдарда.

Кілттік сөздер: АТМОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, ТЕПЕ-ТЕҢСІЗДІК ЖҮЙЕ, ТОЛҚЫНДЫҚ АУЫТҚУ.

The features of the spectra of wave disturbances of the upper atmosphere in the transitional times of day for different seasons of a change in the intensity of the incoming radiation flux into the atmosphere . It is shown that in the daytime in the spectrum of perturbations appear more high frequency harmonics compared to night hours , that can be seen as further evidence of radiation effects on the spectrum of natural oscillations of the atmosphere .

Scope results : atmosphere, earth sciences

Keywords: ATMOSPHERE , IONOSPHERE, NARAVNOVESNYE SYSTEM , WAVE DISTURBANCES

Волновые процессы в атмосфере характеризуют ее основные динамические свойства. Это обусловлено тем, что во многих случаях эти возмущения могут быть представлены совокупностью собственных колебаний, возникающих в результате флуктуаций внешних воздействий на атмосферу. Поэтому изучению волн в атмосфере уделяется особое внимание. Трудности изучения волн, главным образом, связаны с необходимостью учета внешних факторов, определяющих структуру атмосферы и ее состав, понимания законов образования в ней структур и корректного описывать систему: атмосфера – солнечная радиация с учетом взаимосвязи атмосферных структур и потоков радиации. Описание системы: атмосфера – солнечная радиация должно опираться на уравнения, учитывающие процессы обмена энергией между солнечной радиацией и атмосферным газом. В приближении слабого отклонения от стационарности такими уравнениями можно считать уравнения неравновесной термодинамики. В приближении однородного атмосферного газа, без учета химического состава, система уравнений динамики атмосферы в рамках неравновесной термодинамики, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -\nabla \rho \vec{v} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \vec{v} + \rho (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla P + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\rho c_v}{P} \frac{dP}{dt} - c_p \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{T} \{ (\nabla L) - \int \chi'_a(\nu) \rho I_\nu d\nu + (\text{div} J_e) \} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{dJ}{dz} + \mu \rho J = 0 \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения: t – время; ρ – плотность атмосферного газа; T – температура атмосферы; \vec{v} – скорость переноса газа; P – давление; g – ускорение свободного падения; c_v, c_p – теплоемкости при постоянном объеме и давлении, соответственно; I_ν – интенсивность пучка фотонов с частотой ν ; $\chi'_a(\nu)$ – коэффициент поглощения радиации, отнесенный к единице плотности газа ρ ; L – тепловой поток, причем $\nabla L = -\kappa \Delta T$; κ – коэффициент теплопроводности.; J_e – тепловое излучение атмосферного газа; μ – средний коэффициент поглощения солнечной радиации. Поток солнечной радиации J направлен сверху вниз. Линеаризовав систему уравнений динамики (1-4), учитывающую постоянный

обмен энтропией и энергией атмосферного газа с солнечной радиацией и разложив входящие в них величины возмущений по гармоникам $e^{-i\omega t + ik_x x + ik_z z}$, получаем дисперсионное соотношение для собственных колебаний неравновесной атмосферы.

Оно имеет вид:

$$\begin{aligned} \omega^4 - \frac{4\sigma T_0^3}{\rho_0 c_V} k_z \omega^3 - g\gamma (H k^2 - ik_z) \omega^2 + \frac{4\sigma T_0^3 g\gamma}{\gamma \rho_0 c_V} ik_z (iH k^2 + k_z) \omega + \\ + \frac{\mu c^2}{\gamma T_0 c_V} \frac{ik_z J_0 k^2}{ik_z - \mu \rho_0} \omega + g^2 (\gamma - 1) k_x^2 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь i – мнимая единица; ω – частота гармоника, k_x, k_z – соответствующие компоненты волнового вектора вдоль осей x, z , причем $k^2 = k_x^2 + k_z^2$; $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$; $H = c^2 / (g\gamma)$ – так называемая высота однородной атмосферы.

Очевидно, что дисперсионное соотношение (5) носит приближенный характер. Строго оно применимо только для таких характерных масштабов возмущений, которые определяются неравенством $H \gg \lambda/k_z$. В остальных случаях его можно использовать только для качественных оценок с соответствующими оговорками. Второй и четвертый члены соотношения (5) обусловлены неравновесностью атмосферы. Численные расчеты дисперсионного соотношения (5) на различных высотах (в интервале от 20 до 80 км.) выполнялись с использованием фоновых значений температуры, давления, плотности по данным для модели атмосферы ARDC 1959 [1].

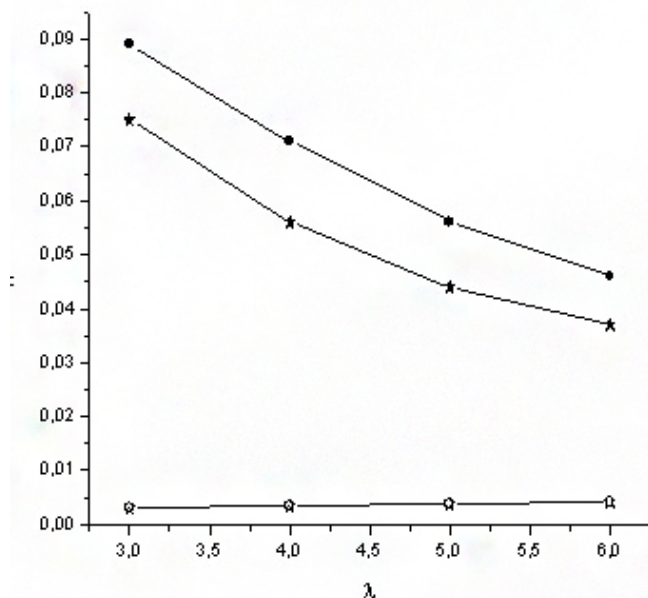
Интегральный коэффициент поглощения солнечной радиации μ был рассчитан таким образом, чтобы поток солнечной радиации ослабевал до поверхности Земли на 30 – 50 %, т.е. до значения $J_0 = 800 - 1000 \text{ Вт/м}^2$. Предполагалось, что μ не зависит от высоты, согласно расчетам $\mu = 0.0022$.

Расчеты дисперсионного соотношения (5) проводились для длин волн $\lambda_x = 10 \div 100 \text{ км}$, $\lambda_z = 1 \div 10 \text{ км}$. Результаты расчетов равновесного и неравновесного спектров колебаний атмосферы при наличии солнечной радиации и без нее (т.е. день и ночь) приведены на рисунке 1. Согласно этим результатам в обоих случаях с ростом температуры спектр колебаний сдвигается в высокочастотную область. В равновесном случае этот сдвиг связан с различием температуры днем и ночью и составляет всего доли процента, что находится за пределами возможности экспериментального обнаружения.

Сдвиг неравновесного спектра весьма существенен. В зависимости от высоты атмосферы и длины волны он может достигать до десятков процентов, согласно результатам численных расчетов. Такой сдвиг может быть обнаружен

экспериментальным путем. Его обнаружение послужит необходимым аргументом в пользу правильности теоретических расчетов неравновесного спектра, а также может служить достаточно серьезным аргументом в необходимости учета неравновесности атмосферы при ее моделировании.

Численные расчеты дисперсионного соотношения (5) на ионосферных высотах (в интервале от 100 до 250 км) выполнялись с использованием фоновых значений температуры и плотности по данным модели атмосферы MSIS. Остальные параметры были взяты из модели CIRA. На рисунке 2 показано изменение коэффициента поглощения с высотой и временем суток, на рисунке 3 приведено сравнение неравновесного и равновесного спектров для высот 0-250 км. Как видно из приведенных рисунков, максимальные искажения спектра собственных колебаний атмосферы на ионосферных высотах, связанные с неравновесными эффектами, появляются в переходные часы суток, когда происходит резкое изменение притока солнечной энергии в атмосферу. Предварительные оценки показали, что они достигают одного процента.



Кружки – день; звездочки – ночь; закрашенные – неравновесная атмосфера; незакрашенные – равновесная атмосфера.

Рисунок 1 – Зависимость частоты колебаний ω от λ в неравновесной и равновесной атмосфере в дневное и ночное время суток, рассчитанное по фоновым значениям параметров на высоте $h=50$ км

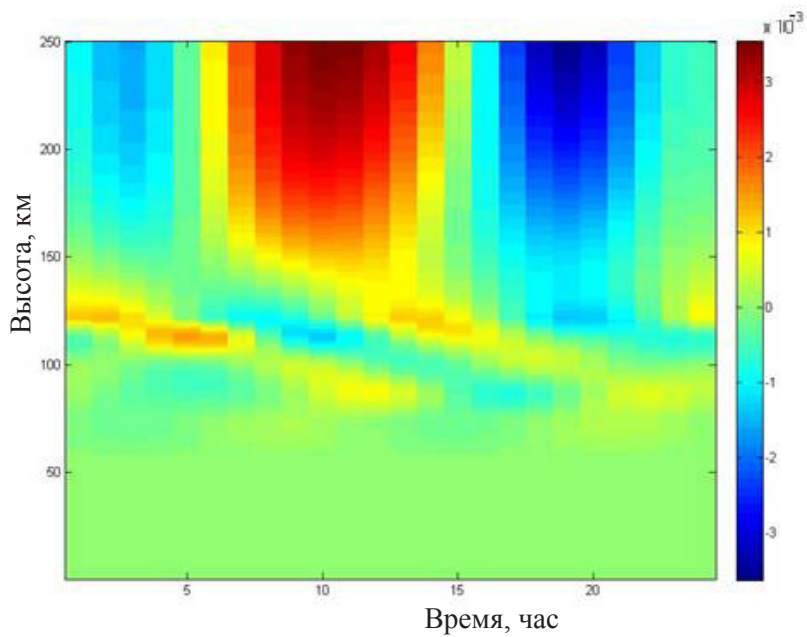


Рисунок 2 – Изменение коэффициента поглощения с высотой и временем суток

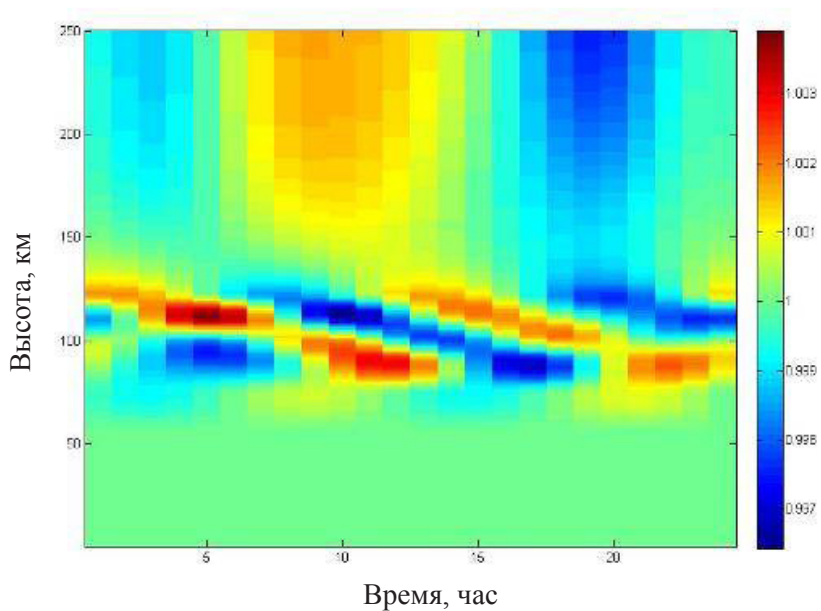


Рисунок 3 - Отношение неравновесного спектра к равновесному для высот 0-250 км

Экспериментальные исследования неравновесных эффектов в атмосфере в спектральном составе среднemasштабных волновых возмущений атмосферы, обусловленных потоками поступающего в атмосферу солнечного излучения и уходящей из нее радиации, выполнялась в рамках следующих задач:

- 1) изучение спектра собственных колебаний атмосферы при изменении освещенности атмосферы;
- 2) исследования эффектов неравновесности атмосферы на различных высотах атмосферы.

С помощью спектрального анализа исследовались данные записи вариаций давления, за август, сентябрь, январь 2002 г. и данные измерений ионосферы: 15-ти минутные данные критической частоты за март, июнь, сентябрь, декабрь 2005 года. Данные были получены на станции вертикального зондирования ДТОО «Институт ионосферы» (ионосферные), на высокогорной станции КЛ ИИ, Алматы, высота 3340 м над уровнем моря (запись микровариации давления) и на украинской станции «Вернадский», Антарктида (6515ЮШ, 6416ЗД) (ионосферные данные и данные микровариации давления). Атмосферное давление измерялось струнным датчиком с точностью регистрации ± 0.05 мб. Минимальный интервал накопления данных – одна минута для алматинских данных и пять минут – для антарктических. Экспериментальные данные антарктической станции использовались для выявления эффекта сдвига дневного спектра относительно ночного, с учетом того, что полярная ночь и полярный день длятся несколько месяцев, что дает преимущество при статистической обработке данных (более длинная реализация). Данные наблюдений были скомпонованы по двум интервалам суток: день, ночь с использованием местного времени, не включая переходные часы суток восхода и захода солнца (для Антарктиды: август соответствует полярной ночи, сентябрь – переход от ночи ко дню, январь – полярный день) [2].

Поскольку реальные данные содержат ошибки измерений из-за сбоев аппаратуры, внешних помех и прочего, временные ряды подвергались предварительной обработке – удалялись грубые ошибки (выбросы), восполнялись интерполированием отсутствующие наблюдения. Очищенные от помех ряды нормированием приводились к единым относительным единицам.

Интерес представляет высокочастотная составляющая, которая из исходных рядов выделялась путем снятия низкочастотного тренда таким образом, что оставлялся вч ряд в полосе периодов 30 мин. – 180 мин для чего использовался

полосовой весовой фильтр. Выделенный ВЧ ряд подвергался Фурье-преобразованию.

Для количественных оценок введена интегральная мера – вес, характеризующий смещение «центра тяжести» спектра и рассчитываемый по формуле:

$$\omega_{\bar{\omega}} = \frac{\sum_i f_i \cdot \omega_i^*}{\sum_i f_i} \quad (6)$$

где f_i - i – ое значение спектральной плотности в относительных единицах, ω_i^* - i – ое значение частоты в относительных единицах.

Проведя расчеты по формуле (6) и представив значения в размерном виде, мы получили значения частот, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Данные значения средневесовой частоты спектра вариации давления

Сезон замеров	Антарктида	Алматы	
		Ночь	День
Август	$w=7.3 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=8 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=8.5 \cdot 10^{-4}$ Гц
Сентябрь	$w=8.2 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=7.2 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=7.3 \cdot 10^{-4}$ Гц
Январь	$w=7.6 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=7.5 \cdot 10^{-4}$ Гц	$w=7.6 \cdot 10^{-4}$ Гц

Таким образом, следует отметить, что наблюдается явная тенденция смещения спектра в высокочастотную область днем относительно ночного спектра, отличие составляет десятки процентов, что подтверждает правильность теоретических расчетов неравновесного спектра, а также может служить достаточно серьезным аргументом в необходимости учета неравновесности атмосферы при ее моделировании.

Для определения эффектов неравновесности в переходные часы суток были использованы записи вариаций давления, полученные на станции космических лучей г. Алматы. Чтобы установить тенденцию смещения спектра в ту или иную область, обработка данных выполнялась следующим образом. Исследовались минутные данные измерения давления за январь 2002 года, реализации длиной в 1000 точек (16 ч 40 мин) обрабатывалась с помощью программы анализа динамического спектра по 4 часа с шагом в 1 час [3]. Для анализа выбирались

невозмущенные периоды наблюдений. олучено, что в заходные часы суток наблюдается тенденция сдвига спектра в низкочастотную область (таблица 2, рисунок 3). В восходные периоды суток сдвиг практически не наблюдается (таблица 3, рисунки 3,4).

Таблица 2 – Средняя весовая функция спектра для временных интервалов наблюдения с 13:00 до 22:00

Дата	13.00-17.00	14.00-18.00	15.00-19.00	16.00-20.00	17.00-21.00	18.00-22.00
04.01.02	7,238	7,006	6,349	6,699	5,672	5,385
05.01.02	11,785	12,335	11,862	10,983		
06.01.02		7,792	8,182	7,05	6,972	7,145
07.01.02	8,897	9,924	8,974	9,081	9,63	8,087
09.01.02	7,329	7,052	7,114	7,58	9,319	9,174
11.01.02	7,261	6,788	7,133t	6,424	6,197	5,791
13.01.02	6,511	6,704	7,634	7,498	7,211	7,487
14.01.02	8,579	7,907	7,849	7,713	8,598	

Таблица 3 – Средняя весовая функция спектра для временных интервалов наблюдения с 01:00 до 09:00

Дата	01.00-05.00	02.00-06.00	03.00-07.00	04.00-08.00	05.00-09.00
01.01.02	7,92	8,379	8,59	8,229	8,776
02.01.02	9,514	9,58	9,394	9,754	10,303
03.01.02		7,719	8,638	9,062	8,996
04.01.02	9,842	9,453	10,246	9,18	7,747
06.01.02	8,229	8,776	8,411	8,437	9,505
08.01.02	9,45	7,88	6,561	6,833	6,773
09.01.02	6,691	7,273	7,615	7,591	
10.01.02	5,724	5,876	5,561	6,414	6,63
11.01.02	4,746	4,468	4,843	4,944	5,467
12.01.02			3,758	3,717	4,037
13.01.02	4,657	5,036	5,05	5,189	5,663
15.01.02	13,742	8,369	8,133	8,099	8,009

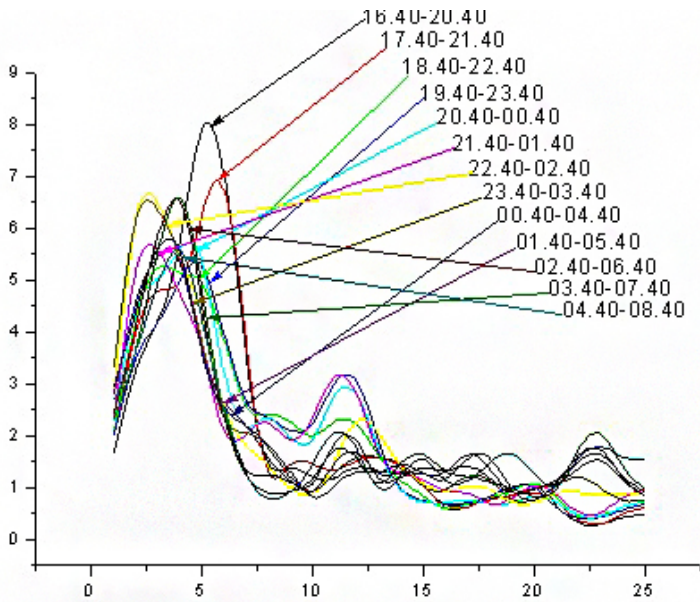


Рисунок 4 – Динамический спектр значений атмосферного давления за период с 1 января 2002г (16 ч. 40 мин) до 2 января 2002г (09 ч. 20 мин), измеренных на высоте 3340 м над уровнем моря вблизи г. Алматы (Космостанция Института ионосферы)

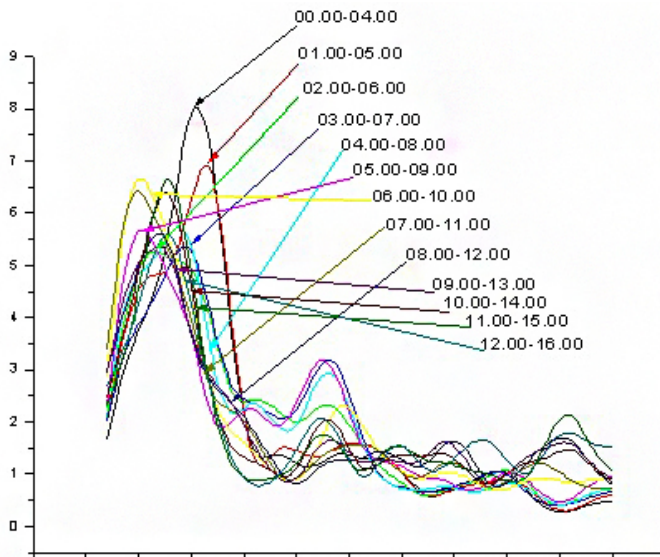


Рисунок 5 – Динамический спектр данных давления за 01.01.02 измеренных на станции космических лучей Института ионосферы за период времени с 00.00 по 16.40.

Природа такой закономерности может быть объяснена так. В переходные часы суток в толще атмосферы возбуждаются АГВ, обусловленные движением солнечного терминатора [4]. Спектр этих волн в утренние часы более высокочастотный, чем в вечерние часы. После генерации этих волн они, в результате диссипативных процессов, постепенно затухают, причем высокочастотные гармоники затухают быстрее, чем низкочастотные. Это обуславливает сдвиг спектра в низкочастотную область. Но из-за неравновесных эффектов в дневные часы суток спектр собственных колебаний должен быть более высокочастотный, чем в ночные часы. В связи с этим поведение спектра волн, генерируемого в утренние и вечерние часы, определяется двумя факторами. После восхода Солнца спектр волн в результате диссипативных процессов будет стремиться к затуханию. Но вследствие того, что резонансные свойства атмосферы сдвигаются в высокочастотную область, диссипативная тенденция сдвига спектра в низкочастотную область может не наблюдаться. В то же время в вечерние часы тенденции диссипативного сдвига спектра в низкочастотную область совпадает с тенденцией его сдвига в низкочастотную область, обусловленную неравновесными эффектами. Поэтому должна существовать асимметрия динамического спектра волновых колебаний атмосферы, которую мы и наблюдаем по данным вариации давления.

Для ионосферных высот проведен спектральный анализ данных измерений ионосферы, полученных на станции вертикального зондирования ДТОО «Институт ионосферы» методом оконного преобразования Фурье, по алгоритму БПФ. Ширина прямоугольного окна составляла 256 минут для магнитных данных (256 точек). Сдвиг окна составлял одну точку. Одна точка соответствовала одной минуте.

Спектрограммы получались для каждого дня для последовательных интервалов времени. С целью выявления суточных закономерностей поведения спектров, была выполнена модификация спектральной обработки, позволяющая выполнять сложение спектров за идентичный период времени различных суток наблюдений. Это позволило получать усредненные спектрограммы за весь период наблюдений. Аналогичным образом получались усредненные спектры за различные месяцы и различные сезоны года. На рисунке 5 представлены результаты спектральной обработки критических частот ионосферы в переходные часы суток.

Спектрограмма Fmax

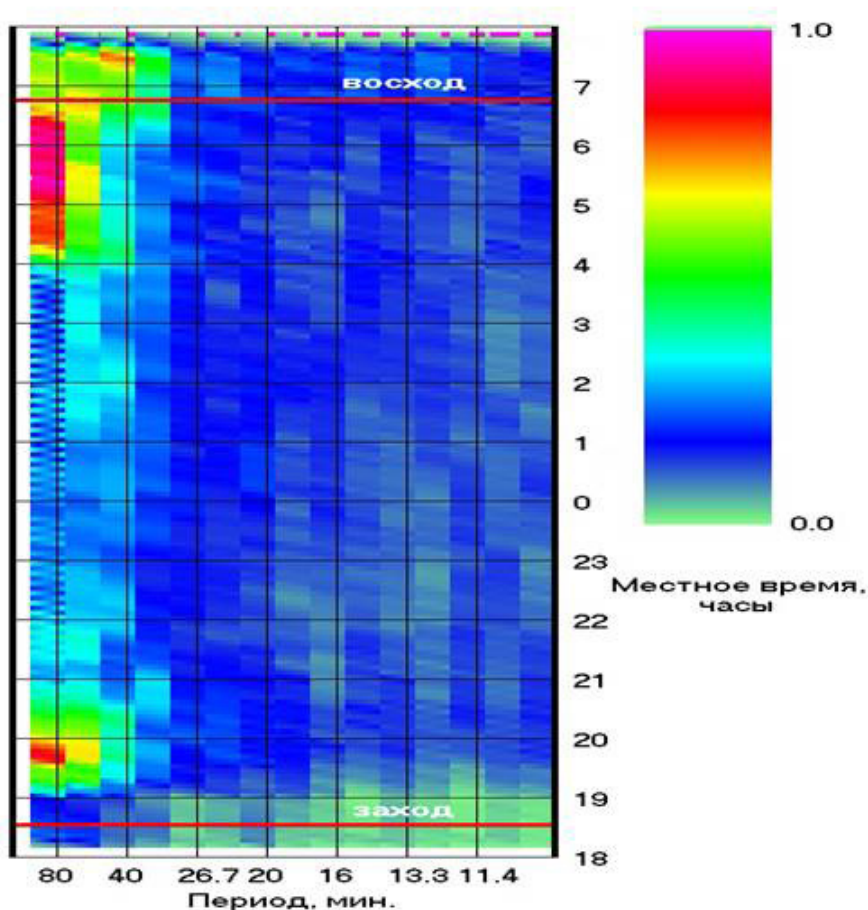


Рисунок 6 – Спектрограмма данных измерений ионосферы за январь 2005 г.

Согласно поученным результатам наблюдается увеличение амплитуд возмущений в дневные часы суток. Особенно ярко эта тенденция заметна летом. Полученные результаты позволяют сделать вывод о тенденции усиления активности волновых возмущений и их сдвига в высокочастотную область на ионосферных высотах с ростом освещенности атмосферы. На эту тенденцию накладываются эффекты генерации волн Солнечным терминатором. Так же были рассмотрены отличительные особенности спектра атмосферных волн в дневные и ночные периоды, полученные посредством цифровой обработки данных вертикального зондирования ионосферы, полученных на украинской

антарктической станции «Академик Вернадский», Антарктида (6515S, 6416W).

Март – переход от полярного дня к полярной ночи. Минимальные значения электронной концентрации в основном приходятся на 02.00-04.00 (значение времени мировое), встречаются дни, когда они приходятся на 05.00 и 06.00. Максимальные значения электронной концентрации приходятся на дневное время суток. При этом наблюдается большой разброс по времени. Время восхода и захода Солнца в начале месяца 9:13 и 23:45, в конце месяца 10:49 и 21:53.

Июнь в южном полушарии – полярная ночь. Все максимальные значения электронной концентрации приходятся на интервал времени от 10.00 до 14.00. По минимуму значений критических частот нельзя однозначно выявить такой промежуток времени. Время восхода и захода Солнца в начале месяца 14:03 и 18:26, в конце месяца 14:32 и 18:08.

Сентябрь – переход от ночи ко дню. Минимальные значения электронной концентрации приходятся на ночь в основном в интервале времени с 3.00-7.00. Максимальные значения электронной концентрации в дневное время, разброс по времени большой. Время восхода и захода Солнца в начале месяца 11:22 и 21:11, в конце месяца 9:35 и 22:38.

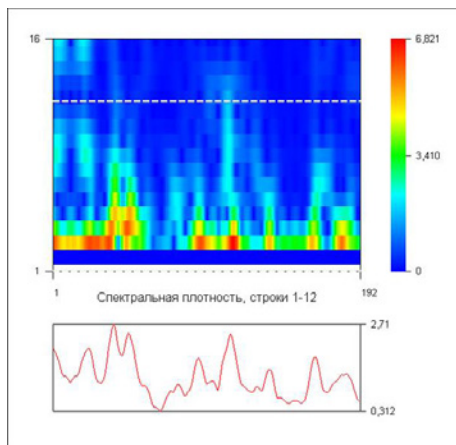
Декабрь – полярный день в Антарктиде. В основном максимальное значение электронной концентрации приходится на промежуток времени 20.00 – 22.00. По минимальному значению критических частот, разброс по времени большой: с 7.00 до 17.00, встречаются дни, когда минимум был в 3.00 или 23.00. Время восхода и захода Солнца в начале месяца 5:47 и 2:25, в конце месяца 5:22 и 3:17.

Для обработки данных использовалась «Система обработки сигналов SOS-OMIR» (версия от 12.09.2011), разработанная в лаборатории космических систем научного назначения, института космической техники и технологий АО «НЦКИТ». Поскольку реальные данные содержали ошибки измерений из-за сбоев аппаратуры, внешних помех и других факторов временные ряды подвергались предварительной обработке – удалялись грубые ошибки (выбросы восполнялись интерполированием отсутствующих наблюдений). Для анализа данных выбран метод динамического спектра и анализировалось поведение динамики спектров колебаний в полосе периодов 15 мин – 3 часа, длина шага по выбранному ряду составляет 15 мин, длина куска равна шести часам. Полученные характерные спектры для каждого выбранного периода приведены на рисунке 2.

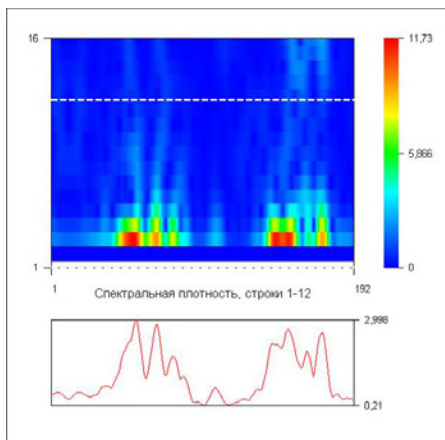
В переходные месяцы: март (рисунок ба) и сентябрь (рисунок бв), тенденция смещения спектра волновых возмущений в зависимости от времени дня и ночи

четко не проявляется. Причиной тому может являться различные явления, происходящие на солнце и в приземном слое, а также особенности динамики полярной ионосферы. В марте выявлено 58% случаев, а в сентябре - 50% случаев смещения спектральных возмущений в высокочастотную область в восходные часы. В декабре (полярный день, рисунок 6г) выявлено 75% случаев смещения спектральных возмущений в высокочастотную область в восходные часы. В июне (полярная ночь, рисунок 6б) четко прослеживается сдвиг спектра в высокочастотную область во время восхода Солнца и сдвиг спектра в низкочастотную область после захода Солнца (восход Солнца приходится на период времени 14 часов мирового времени, заход – на 18 часов мирового времени, длительность дня составляет 4 часа). Выявлено 80% случаев смещения спектральных возмущений в высокочастотную область в восходные часы.

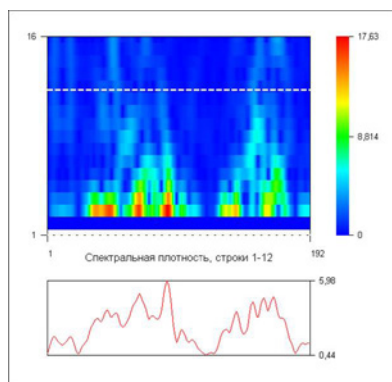
Таким образом, статистическая обработка данных выявила отличие характера изменения спектров колебаний давления атмосферы в переходные часы суток. В утренние часы суток диссипативный механизм сдвига спектра в низкочастотную область может компенсироваться неравновесным сдвигом в высокочастотную область. В вечерние часы диссипативная тенденция сдвига спектра в низкочастотную область совпадает с подобной тенденцией, обусловленной неравновесными эффектами. Поэтому спектр заметным образом смещается в низкочастотную область.



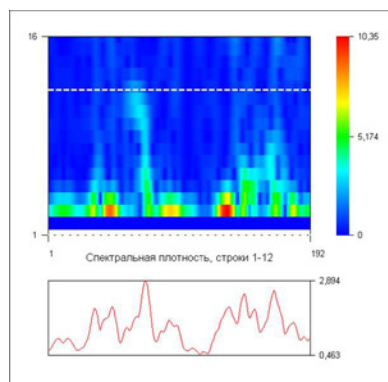
а) март



б) июнь



в) сентябрь



г) декабрь

Рисунок 7 – Динамический спектр данных колебаний давления атмосферы – за 48 часов каждого месяца, соответственно: март, июнь, сентябрь, декабрь

Из анализа статистического материала различных параметров атмосферы выявлены отличительные закономерности в спектре поведения возмущений атмосферы в переходные часы суток для различных сезонов, обусловленные изменением потока радиации в атмосферу. Обращает на себя внимание общая для всех компонент тенденция увеличения амплитуд возмущений для летних месяцев. При этом в спектре полуденных возмущений появляются более высокочастотные гармоники, чем в ночные часы суток, что является дополнительным подтверждением влияния радиации на спектр собственных колебаний атмосферы.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Развитие методов исследований неравновесной атмосферы».

Литература

1. Справочник по геофизике// М.: Наука. –1965. –571с.
2. Антонова В.П.,Дунгенбаева К.Е.,Зализовский А.В.,Инчин А.С., Крюков С.В.,
3. Сомсиков В.М., Ямпольский Ю.М. Различие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленное неравновесными эффектами в атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2006. –Том 46, №1. –С.106-
4. Сомсиков В.М., Нургалиева К.Е. Неравновесные эффекты в распространении атмосферных волн в переходные часы суток//Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2007. –Т. 2. –Вып. 9. –С. 55-59.
5. Сомсиков В.М., Курмангалиев Д.А. Структура волн поля давления атмосферы, генерируемая солнечным терминатором. Ч.2. Расчеты глобальной структуры поля давления атмосферы// Ионосферные волновые возмущения: сб. статей. Алма-Ата. –1989. –С.19-27

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ПО ВАРИАЦИЯМ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОГОРНОГО
НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА

Крякунова О.Н.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В статье отражены этапы становления и развития высокогорной станции космических лучей Института ионосферы. Представлены основные результаты исследования космической погоды по комплексу данных Алматинского высокогорного нейтронного монитора, наземных установок и спутников.

Область применения результатов: науки о Земле, космическая погода

Ключевые слова: КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, НЕЙТРОННЫЙ МОНИТОР, КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Мақалада Ионосфера институтының биік таулы ғарыштық сәулелер станцияларының қалыптасу және даму кезеңдері келтірілген. Жер-үсті қондырғылары және жер серіктерінің, Алматы биік таулы нейтронды монитормының кешенді мәліметтері арқылы ғарыштық ауа-райын зеттеудегі негізгі нәтижелері таныстырылған.

Нәтижелерді қолдану аумағы: Жер туралы ғылымдарда, ғарыштық ауа-райы.

Кілттік сөздер: ҒАРЫШТЫҚ СӘУЛЕЛЕР, НЕЙТРОНДЫҚ МОНИТОР, ҒАРЫШТЫҚ АУА-РАЙЫ.

In the paper the history of high mountain cosmic ray station of the Institute of Ionosphere is described. The main results of space weather research, obtained by means of Almaty high mountain neutron monitor and ground base and satellites data, are reviewed.

The area of application of the results: Earth's Sciences, Space weather.

Keywords: COSMIC RAYS, NEUTRON MONITOR, SPACE WEATHER

1. История создания и развития станции космических лучей

Результаты первых исследований околоземного космического пространства во время Международного геофизического года (МГГ, 1957-1958 гг.) и Международного года спокойного Солнца (1964-1965 гг.) показали, что сеть наземных обсерваторий, изучающих ионосферу, магнитное поле Земли, условия распространения радиоволн, а также интенсивность солнечного и космического излучений, должна быть расширена. Стало ясно, что данные наземной регистрации космических лучей являются уникальным материалом для исследования явлений в околоземном и межпланетном пространстве. В 1965-1966 гг. начались исследования радиоизлучения Солнца и интенсивности галактических космических лучей на аппаратурном комплексе в Секторе ионосферы (1300 м над уровнем моря), где был установлен телескоп на счетчиках СИ-5Г, и работы по созданию высокогорного нейтронного супермонитора в горах на высоте 3340 м над уровнем моря (руководитель работ Егоров Ю.А.). С августа 1973 г. началась непрерывная регистрация нейтронной компоненты космических лучей высокогорным нейтронным монитором 18НМ-64 [1] (вертикальная жесткость геомагнитного обрезания 6.7 ГВ). Нейтронный супермонитор состоит из 18 счетчиков СНМ-15, расположенных в трех стандартных секциях. Суммарная скорость счета монитора равна $(4.5 - 5.0) 10^6$ имп./час (в зависимости от фазы солнечной активности). Руководил работой станции И.А. Пименов.

В 1978-1992 гг. работой станции и группы космических лучей руководил А.Г.Зусманович. В 1984-1985 гг. Л.А.Миркиным на станции создана и введена в эксплуатацию установка по регистрации общей ионизирующей и мюонной компонент интенсивности космических лучей, состоящая из 48 больших пропорциональных счетчиков СГМ-14.

В 1988-1991 гг. В.М. Аушевым совместно с сотрудниками Тянь-Шанской высокогорной станции космических лучей Физического института им. П.Н.Лебедева Академии наук СССР (ФИАН), расположенной в том же месте, была создана система для регистрации нейтронов в каждом счетчике.

До 2000 г. измерения 5-минутных и часовых значений интенсивности потока космических лучей и атмосферного давления проводились с помощью регистраторов с выводом результатов на печатающие устройства один раз в час. Дальнейшая обработка заключалась в коррекции данных на атмосферное давление и представлении месячных таблиц часовых значений в Международные центры данных WDC-B2 (Москва) и WDC-C (Япония). В 2000 г. в сотрудничестве с груп-

пой космических лучей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН, г.Троицк, Московская область) в рамках контракта с исследовательской лабораторией ВВС США (SPC-98-4035, EOARD/AFMC F617089-98-WE064) “Мониторинг и исследование наземных возрастаний солнечных космических лучей с помощью высокогорного нейтронного монитора” экспериментальная установка 18НМ-64 была оснащена автоматизированной системой регистрации и обработки данных. Регистрация канальных данных монитора стала производиться в 1-минутном режиме, а обработка и представление результатов – в часовом. Сбор первичной информации производился специализированной платой счетчиков, изготовленной в ИЗМИРАН. Программное обеспечение системы состояло из блоков сбора, обработки, представления данных и блока контроля работы технических устройств. В 2003 г. Степановым А.В. был разработан первый сайт высокогорной станции космических лучей, на котором с часовым обновлением в режиме реального времени представлялись данные нейтронного монитора в графическом и текстовом виде.

В 2005-2007 гг. в рамках проектов, выполняемых по Государственной программе «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 гг.», произведено переоснащение технических и программных средств станции космических лучей. Заменены усилители-формирователи канальных сигналов со счетчиков и система кабельной связи монитора с аппаратурой регистрации (Чубенко А.П., Щепетов А.Л.), Николаевским Н.Ф. разработан новый сайт с представлением минутной информации в режиме реального времени (cosray.ionos.kz/CosRay/index.htm), создана система минутной обработки данных монитора. Входная часть системы реализована на трех компьютерных платах PCI-1780 (8-канальные счетчики фирмы Advantech). В качестве датчика атмосферного давления используется цифровой барометр БРС-1М. На том же web-сайте представлен архив экспериментальных данных за всю историю существования станции. Программное обеспечение обслуживания банка производит запись поступающей оперативной информации и выборку данных за любой период времени. Вся информация в графическом и текстовом виде представляется на сайте и обновляется ежеминутно в режиме реального времени. Вид главной страницы сайта представлен на рисунке 1. В рамках выполнения европейского проекта в рамках FP7 «Создание базы данных нейтронных мониторов в реальном времени с высоким временным разрешением (NMDB)» (N 213007, 2008-2009 гг.) была создана система передачи 1-минутных данных высокогорного нейтронного

монитора в реальном времени в европейскую базу данных NMDB (www.nmdb.eu) и получены научные результаты по исследованию космического пространства с помощью мировой сети нейтронных мониторов [1-3].

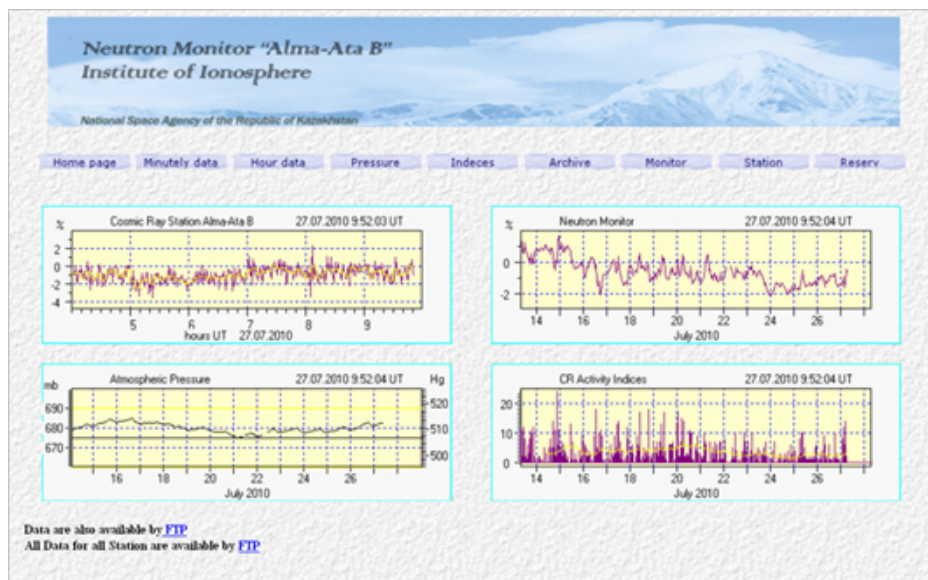


Рисунок 1 – Вид сайта высокогорной станции космических лучей с представлением данных в реальном времени с 1-минутным разрешением

2. Использование данных станции в научных исследованиях

В настоящее время основным направлением исследований на высокогорном нейтронном мониторе является космическая погода. Под термином «космическая погода» подразумевается состояние околоземного космического пространства в интересующей нас области (на Солнце, в солнечном ветре, в магнитосфере, ионосфере или верхней атмосфере Земли) в данное время или за определенный временной интервал. Космическая погода изучается с точки зрения возможных неблагоприятных воздействий ее на жизнедеятельность человека, когда условия в околоземном космическом пространстве могут повлиять на работу и надежность бортовых и наземных технологических систем и представлять угрозу для человеческой жизни или здоровья. Опасные периоды космической погоды могут быть связаны с двумя факторами: повышением радиационного фона в космическом пространстве и возмущением электромагнитной обстановки. Оба класса этих явлений, безусловно, связаны с активными солнечными процессами.

Уровень возмущенности космического пространства отражает разработанный в ИЗМИРАН и Институте ионосферы индекс возмущенности космических лучей [4], который рассчитывается по данным высокогорного нейтронного монитора и представляется в реальном времени на страничке станции космических лучей (cosray.ionos.kz/CosRay/index.htm). На рисунке 2 представлено поведение интенсивности космических лучей по данным высокогорного нейтронного монитора и индексы возмущенности космических лучей во время экстремального периода космической погоды в октябре-ноябре 2003 г., когда аномальная космическая погода сказалась на работе многих искусственных спутников Земли, в частности японский спутник связи Kodama был полностью потерян. Резкие повышения радиационного фона связаны с приходом дополнительного потока частиц, ускоренных в солнечных вспышках. Наземные возрастания солнечных космических лучей свидетельствуют о больших потоках высокоэнергичных частиц вблизи Земли, создающих повышенную опасность для работы спутниковой аппаратуры. Оценки и прогнозирование таких потоков являются задачей первостепенной важности. Современные методы позволяют оценить поведение солнечных космических лучей с энергией > 100 МэВ и ниже (в наиболее опасной области излучения) на основе спектров, которые могут быть получены из данных наземной сети нейтронных мониторов. Поскольку полный профиль наземного возрастания солнечных космических лучей (GLE) заканчивается раньше развития максимума в потоках меньших (опасных) энергий, эти оценки могут быть получены примерно за 20 минут до опасного периода [5]. На рисунке 3 приведены графики рентгеновского излучения по данным спутника GOES, нейтронного монитора Южный Полюс (SOPO) и потоков протонов энергий >100 МэВ и >10 МэВ.

В рамках исследований по европейским проектам INTAS-00-0810 «Развитие методов контроля и прогноза периодов опасного влияния космической погоды на электронику спутников» и INTAS-2000-752 «Ключевые параметры космической погоды» было показано, что во время протонных событий резко возрастает вероятность сбоев в функционировании спутников, причем нейтронные мониторы способны хорошо отражать возмущенное состояние космической погоды, а космические лучи являются важным параметром, который необходимо использовать в разработке прогностических моделей.

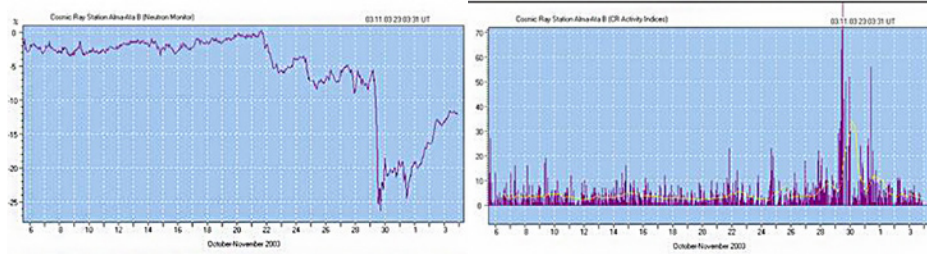


Рисунок 2 – Интенсивность и индексы возмущенности космических лучей в октябре-ноябре 2003 г.

Возмущенные периоды космической погоды могут характеризоваться поведением индексов возмущенности космических лучей, рассчитываемых на основе экспериментальных данных высокогорного нейтронного монитора ДТОО «Институт ионосферы».

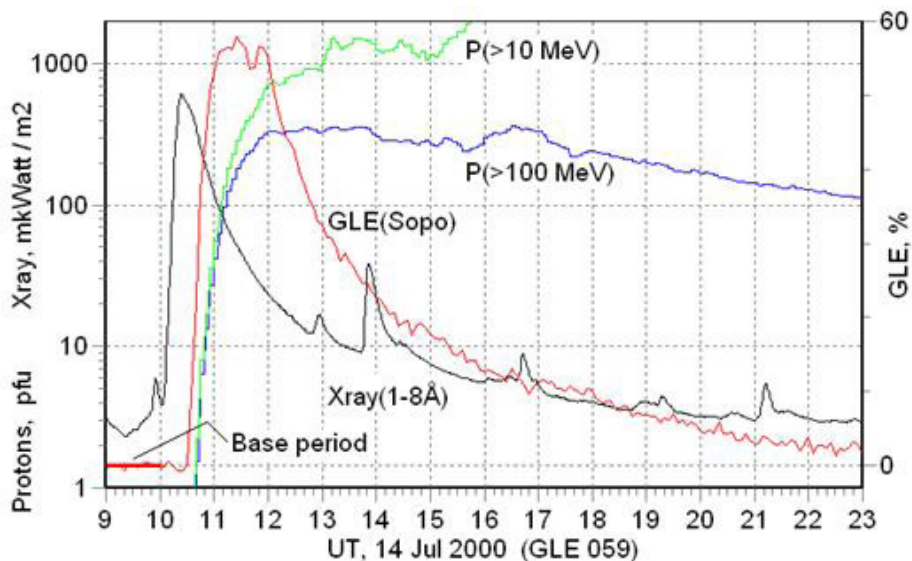


Рисунок 3 – Иллюстрация временных задержек относительно начала вспышки для рентгеновского (1-8 Å), наземного и протонного (>100 МэВ и >10 МэВ) возрастных на примере события 14 июля 2000 г.

На основе комплексной базы данных о состоянии гелио- и геофизической обстановки в околоземном космическом пространстве и банка данных о сбоях в работе спутников [6] было получено, что частота сбоев на спутниках возрастает в течение недели после повышения индекса возмущенности космических лучей (рисунок 4). Полученный результат дает основание для создания системы оценки опасности радиационной обстановки и уровня возмущенности космического

пространства, опасного для функционирования космических аппаратов [7].

Кроме исследования вариаций космических лучей межпланетного происхождения (с различными периодами), данные высокогорной станции института используются для исследования солнечных протонов высоких энергий (GLE - наземных возрастаний солнечных космических лучей) [8-10] и нейтронов, генерированных во время мощных вспышек [11-12].

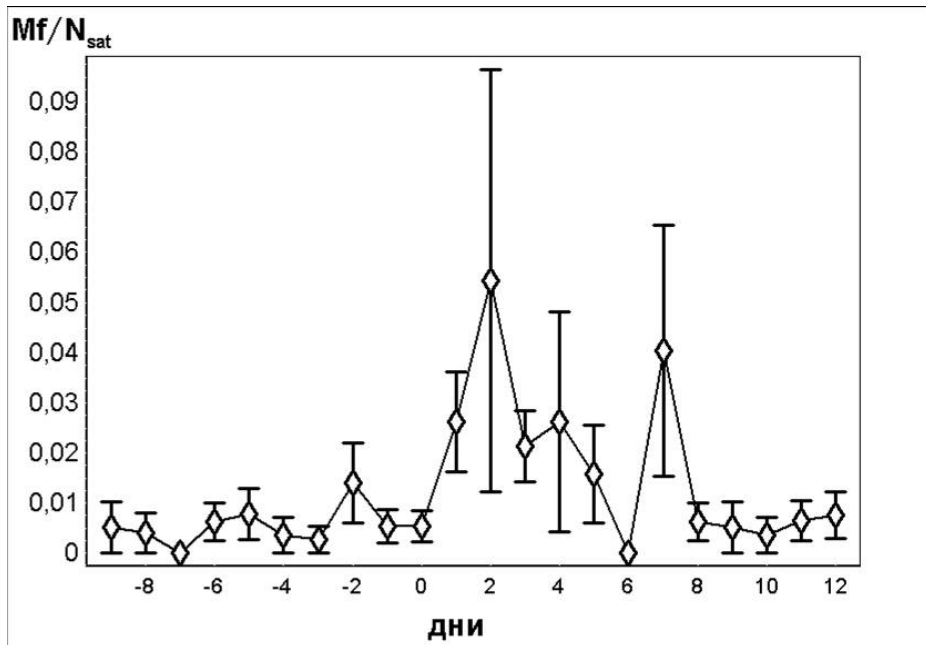


Рисунок 4 – Средняя частота сбоев в работе электроники космических аппаратов до и после внезапного повышения индекса активности космических лучей, рассчитанного по данным высокогорного нейтронного монитора

С тех пор, когда впервые было показано, что прямые солнечные нейтроны могут достигать Земли и регистрироваться наземными детекторами, создание эффективной сети для регистрации солнечных нейтронов – важная цель физики космических лучей. Создана специальная сеть нейтронных телескопов, но самые большие и надёжно выделенные эффекты такого рода пока наблюдались только на обычных нейтронных мониторах. Уже после первых сообщений о регистрации солнечных нейтронов стало ясно, что наземные возрастания солнечных космических лучей могут быть двух типов: обычные, вызванные ускоренными на Солнце заряженными частицами (протонами и ядрами) и аномальные

нейтронные возрастания, причиной которых являются солнечные нейтроны. Можно говорить о протонных и нейтронных наземных возрастаниях. Их можно наблюдать по отдельности, но возможны (и действительно наблюдались) смешанные события, когда два типа возрастания наблюдаются последовательно или одновременно. Примером чисто нейтронного события может служить событие 3 июня 1982 г., пример смешанного дало 24 мая 1990 г. Большинство GLE (Ground Level Enhancements) можно называть протонными (не забывая, что в их создании участвуют и ядра). Однако не исключено, что в каких-то хорошо известных событиях, которые мы считаем обычными GLE, есть вклад от солнечных нейтронов [13]. Для определения вклада солнечных частиц в общий поток интенсивности космических лучей на средних широтах, где, в основном, наблюдаются возрастания солнечных космических лучей небольших амплитуд, была разработана методика выявления событий наземных возрастаний солнечных космических лучей (GLE) в тех случаях, когда такие события не обнаруживаются визуально, использующая критерий Стьюдента [14].

Известно, что возрастания солнечных нейтронов можно зарегистрировать только там и тогда, где и когда Солнце высоко над горизонтом. Поэтому для мониторинга нейтронных возрастаний в определённый момент подходят только станции, на которых, обязательно, локальный день и желательно локальное лето. При этом высокогорные и низкоширотные станции намного предпочтительнее равнинных и высокоширотных. Высокогорный нейтронный монитор ДТОО «Институт ионосферы» один из немногих станций мировой сети нейтронных мониторов, на котором возможно регистрировать такие редкие события, как приход солнечных нейтронов. Одно из таких возможных событий представлено на рисунке 5 [12].

Результаты исследований нестационарной модуляции галактических космических лучей солнечным ветром и связь солнечных источников с большими геомагнитными возмущениями приведены в работах [15,16]. С 2006 г. лаборатория диагностики и прогноза космической погоды на основе анализа комплексных спутниковых и наземных гелиогеофизических данных и разработанных методик прогнозирования космической погоды ежедневно выдает прогноз геомагнитной и радиационной (www.ionos.kz/?q=en/node/21) [17].

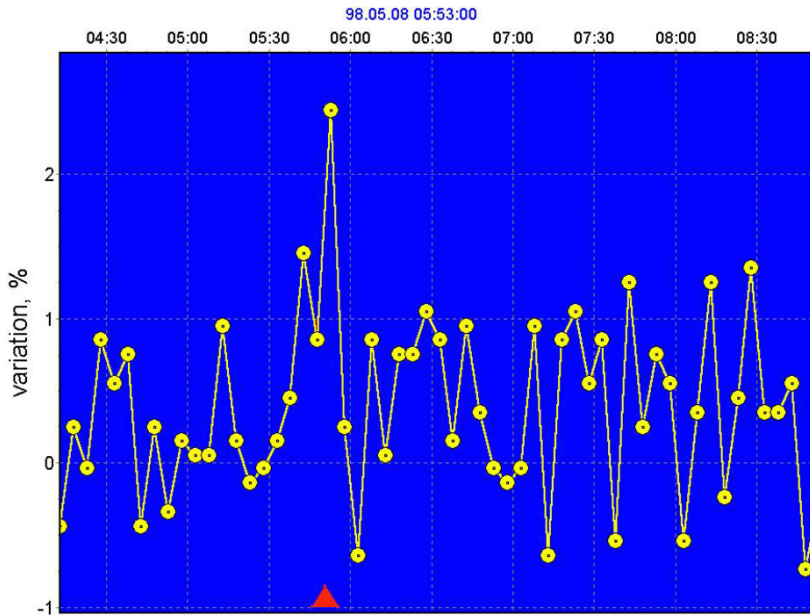


Рисунок 5 – Вариации космических лучей 8 мая 1998 г. вблизи солнечной вспышки с возможной регистрацией солнечных нейтронов, красный треугольник – начало вспышки (flare onset)

В настоящее время высокогорная станция космических лучей ДТОО «Институт ионосферы» функционирует в составе мировой сети станций нейтронных мониторов [18], решая задачи космической погоды в реальном времени. Сотрудничество с Физическим институтом им. П.Н.Лебедева (РАН, г. Москва) позволяет решать задачи ядерно-физического аспекта исследований космических лучей с помощью нейтронного монитора [19]. Высокогорный нейтронный монитор включен в европейскую сеть станций NMDB (www.nmdb.eu), где представляются 1-минутные данные в режиме реального времени, а ДТОО «Институт ионосферы» входит в консорциум «Евразийский высокогорный научный центр космических лучей». С 2013 г. исследования космической погоды Республики Казахстан включены в программу Международных инициатив в области космической погоды (International Space Weather Initiative, ISWI) [20].

Автор выражает глубокую благодарность всем сотрудникам, кто работал на высокогорной станции космических лучей со времени ее основания и проводил измерения в трудных высокогорных условиях.

Работа выполнена по РБК 002 «Прикладные научные исследования в

области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать особенности структуры и динамики магнитосферы, ионосферы и вариаций космических лучей с целью диагностики околоземного космического пространства».

Литература

1. *Zusmanovich A.G., Kryakunova O.N., Shepetov A.L.* The Tien-Shan mountain cosmic ray station of the Ionosphere Institute of Kazakhstan Republic//Advances in Space Research. –2009. –Vol.44. –P. 1194-1199.
2. *Mavromichalaki H., Papaioannou A., Plainaki C., Kryakunova O., Dryn E., Nikolayevskiy N., Dorman L., Pustil'nik L. et al.* Applications and usage of the real-time Neutron Monitor Database//Advances in Space Research. –2011. –Vol. 47. –P. 2210-2222. (doi:10.1016/j.asr.2010.02.019).
3. *Klein K.-L., Fuller N., Steigies C.T., and the NMDB Consortium.* WWW. NMDB.EU: The real-time Neutron Monitor database// Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 7-15 July 2009. –P. 1333.
4. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Antonova V.P., Kryakunova O.N.* Global and local indices of cosmic ray activity//Proc. 26th Intern. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City. USA.–1999. –Vol.6. –P. 472-475.
5. *Anashin V., Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Mavromichalaki H, Sarlanis C., Souvatsoglo G., Vashenyuk E. and Yanke V.* The ALERT signal of ground level enhancements of solar cosmic rays: physics basis, the ways of realization and development//Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 7-15 July 2009. –P. 1104.
6. *Belov A., Dorman L., Iucci N., Kryakunova O., Ptitsyna N.* The relation of high- and low-orbit satellite anomalies to different geophysical parameters.// in “Effects of Space Weather on Technology Infrastructure” edited by I.A. Daglis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, NATO Science Series II. –2004. –Vol.176. –P. 147-163.
7. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Kryakunova O.N., Nikolaevskiy N.F.* Space Weather Research: the Connection between Satellite Malfunction Data and Cosmic Ray Activity Indices// International Journal of Modern Physics A. –2005. –Vol.20, № 29. –P. 6675-6677.
8. *Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Kurt V. and Yanke V.* GLEs in the last three solar cycles//Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 7-15 July 2009. –P. 0993.
9. *Belov A. V., Eroshenko E. A., Kryakunova O. N., Kurt V. G., Yanke V. G..* Ground Level Enhancements of Solar Cosmic Rays during the Last Three Solar Cycles//Geomagnetism and Aeronomy. –2010. –Vol. 50, № 1. –P.21-33.
10. *Kryakunova O.N., Aushev V.M., Dryn E.A., Nikolaevskiy N.F.* Investigation of ground level solar cosmic ray enhancements by means of Alma-Ata high-altitude neutron monitor//Proc. Int. Cosmic Ray Conf., Germany, Hamburg. –2001. –P. 3276-

11. *Aushev V.M., Dorman L.I., Kryakunova O.N., Shvartsman Ya.E., Zusanovich A.* Possible Registration of Solar Neutrons by High-Mountain Neutron Monitor//23-rd Int. Cosmic Ray Conf., Calgary. –1993. Vol. 3. –P. 155-158.
12. *Aushev V., Antonova V., Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Struminsky A.* Search for Solar Neutron Events in Alma-Ata NM Data// Proc. 26 Intern. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City. USA. –1999. –Vol. 6. –P. 50-53.
13. *Belov A., Asipenka A., Dorman L., Eroshenko E., Kryakunova O., Nikolayevsky N., Shepetov A., Yanke V., Zhang JiLong.* A real-time search for solar neutron events in the data of high-altitude neutron monitors//Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 7-15 July 2009. –P. 1107.
14. *Beisembaev R.U., Drobzhev V.I., Dryn E.A., Kryakunova O.N., Nikolaevskiy N.F.* Solar extreme events on the data of Alma-Ata neutron monitor: Identification of ground level enhancements//Advances in Space Research. –2009. –Vol.43. –P. 509-514.
15. *Chertok I.M., Kryakunova O.N.* Post-CME energy release from solar sources of the largest geospace disturbances//31st ESLAB Symposium, Correlated Phenomena at the Sun// Heliosphere and in Geospace, European Space Agency, Special Publication-415, Noordwijk, The Netherlands. –1997. –P.407-411.
16. *Aushev V.M., Kryakunova O.N., Kriukov S.V., Zusanovich A.G.* The influence of solar activity nonstationary conditions on the long term cosmic ray modulation. Advances in Solar Connection with Transient Interplanetary Phenomena// Proceeding of the III SOLTIP Symposium. International Academic Publishers. –1998. –P.547-550.
17. *Abunina M., Papaioannou A., Gerontidou M., Paschalis P., Abunin A., Gaidash S., Tsepakina I., Malimbayev A., Belov A., Mavromichalaki H., Kryakunova O., Velinov P.* Forecasting Geomagnetic Conditions in near-Earth space// Journal of Physics: (doi:10.1088/1742-6596/409/1/012197) IOP Publishing. –2013. –Conference Series № 409. – P. 012197.
18. *Mavromichalaki H., Yanke V., Dorman L., Iucci N., Chilingaryan A., Kryakunova O.* Neutron Monitor Network in Real Time and Space Weather Tasks// Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, edited by I.A. Daglis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht// The Netherlands, NATO Science Series II. –2004. –Vol.176. –P.301-316.
19. *Amurina I.V., Autova G.M., Drobzhev V.I., Kryakunova O.N. et al.* Modern State of the ATHLET Setup at the Tien Shan//International Journal of Modern Physics A. –2005. –Vol.20, № 29. –P. 6778-6780.
20. *Zhantaev Zh., Kryakunova O., Nikolayevskiy N., Zhumabayev B.* Space weather research in Kazakhstan//Sun and Geosphere. –2013, № 8(2). –P.27-33.

ВЫСОКОГОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ИЗМЕРЕНИЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Антонова В.П.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Приведена информация об аппаратурном комплексе для измерения атмосферного электрического поля, который установлен вблизи г. Алматы на высоте 3340 м над уровнем моря.

Область применения результатов: науки о Земле, атмосферное электричество

Ключевые слова: АТМОСФЕРА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, УСЛОВИЯ ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ

Аппаратуралық кешен атмосфералық электрлік өрістерді өлшеу үшін, Алматы қаласына жақын жерде теңіз деңгейінен 3340 м жоғары деңгейде орнатылғаны туралы ақпарат келтірілген.

Нәтижелерді қолдану аумағы: Жер туралы ғылымдарда, атмосфералық электр.

Кілттік сөздер: АТМОСФЕРА, ШАРТТЫ АУА-РАЙЫНДАҒЫ ЭЛЕКТРЛІК ӨРІС.

An information on experimental complex for measurements of the atmospheric electric field is presented. The complex is installed near Almaty at height of 3340 m above sea level.

The area of application of the results: earth sciences, atmospheric electricity

Keywords: ATMOSPHERE, ELECTRIC FIELD, FAIR WEATHER CONDITIONS

Комплексная система регистрации атмосферного электрического поля «ELIS-TS». Международная сеть станций по мониторингу атмосферного электрического поля была создана во второй половине 20 века в период Международного геофизического года (1958 г). В нее вошли станции на территории США, Бельгии, Германии, Венгрии, Японии, Португалии, Канады и СССР. В Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) были разработаны методические указания по наблюдениям за электрическим полем [1]. В Казахстане регулярные измерения атмосферного электрического поля начались в 2007 г в рамках Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы». На высокогорной станции ДТОО «Институт ионосферы» (высота 3340 м над уровнем моря) был установлен аппаратный комплекс «Elis-TS» по измерению атмосферных электрических полей [2]. Внешний вид комплекса представлен на рисунке 1.

Комплексная система регистрации атмосферного электрического поля «ELIS-TS» состоит из двух датчиков. Один датчик чувствителен к высокочастотной переменной компоненте электрического поля, возникающей в грозовой атмосфере во время возвратного молниевых удара («return stroke»), а другой - к медленной квазистатической компоненте E_z (вертикальная составляющая поля). Второй датчик, измеряющий квазистатическое электрическое поле, по принципу действия - электростатический флюксметр (антенна «field mill» - вертушка). В датчике используется принцип периодической экранировки измерительных электродов вращающимся заземленным диском с вырезами. Электрическая схема состоит из входных повторителей с высоким входным сопротивлением, синхронного детектора, на опорный канал которого поступает сигнал с фотодатчика положения диска, фильтра низких частот, выходного буферного усилителя и цепей защиты от перенапряжения и пробоя активных элементов.

Конструктивно антенное устройство помещено в водонепроницаемый корпус, предназначенный для установки «пластинами вниз» с целью ослабления влияния осадков на работу прибора. Прибор обеспечивает измерение электрического поля в диапазоне ± 50 кВ/м, при этом его выходное напряжение меняется в пределах ± 5 В. При 14 – разрядном АЦП это соответствует разрешению в 10 В/м. Частота дискретизации - 20 Гц. Временное разрешение равно 0.05 с в медленном режиме записи. В состав системы входит блок аналоговой обработки и пороговое устройство, вырабатывающее сигнал перевода компьютера в быстрый режим регистрации (временное разрешение – 0.00005с), соответствующий грозовым

условиям. Антенный блок «field mill» регулярно калибруется помещением его в большой плоскопараллельный конденсатор с размерами $(1,5 \cdot 1,5) \text{ м}^2$ на который подается фиксированное калибровочное напряжение. По своим техническим характеристикам комплексная установка Института ионосферы АО «НЦКИТ» по измерению электрического поля не уступает мировым аналогам.

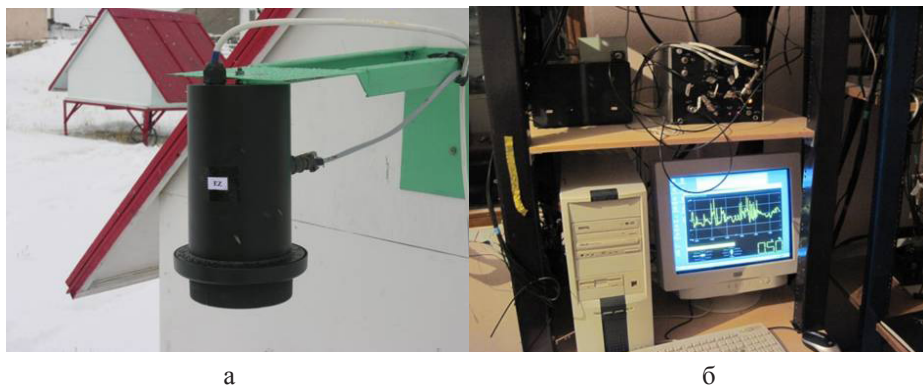
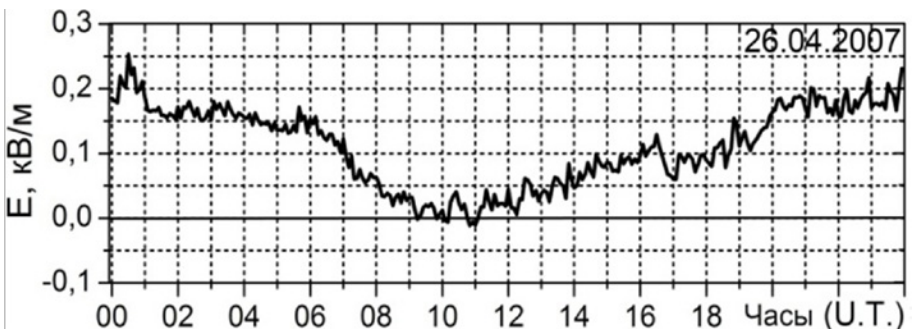


Рисунок 1 – Внешний вид аппаратного комплекса «Elis-TS» по измерению атмосферных электрических полей (а) и система регистрации данных (б)

Особенности вариаций электрического поля в разных метеорологических условиях. Известно, что на регистрируемые вариации приземного электрического поля сильно влияют осадки в виде дождя и снегопада, туман, гроза и т.д. В условиях «хорошей погоды» напряженность электрического поля у поверхности Земли практически постоянна вдоль её поверхности, весьма незначительно меняется во времени и составляет (при выполнении условий «хорошей погоды») 120-150 В/м над океаном и 75-125 В/м над материками. Общепринято, что условия «хорошей погоды» определяются метеоусловиями, соответствующими следующим критериям: отсутствие грозы и всякого рода осадков, инея, тумана, измороси, сильной и умеренной дымки (видимость более 4 км), нижней облачности, верхняя облачность не более 0,3 неба, скорость ветра не более 6 м/с. С точки зрения электродинамики аэроэлектрических процессов условия хорошей погоды соответствуют отсутствию в атмосфере процессов генерации зарядов, электрические процессы устойчиво проявляются, так что принципы квазистатики могут быть использованы [3]. Такие условия на высокогорной станции наблюдаются гораздо чаще с сентября по апрель и значительно реже летом. На особенности суточной вариации квазистатического электрического поля в приземном слое атмосферы на

станциях с разными географическими координатами, высотой над уровнем моря, рельефом места наблюдения помимо глобальных процессов (максимум грозовой активности на земном шаре) влияют и локальные: турбулентность, конвекция, наличие аэрозолей, повышенная радиоактивность в сейсмоактивных регионах, которая влияет на проводимость [4]. Все перечисленные локальные факторы, влияющие на измерения электрического поля и его характеристики, имеют место на Тянь-Шаньской высокогорной станции. Для исследования суточной вариации в работе использовались данные измерений вертикальной составляющей квазистатического электрического поля с временным разрешением 0,05 с. Данные усреднялись на интервале 5 мин. Длина реализации равняется 27 часам. На рисунке 2 представлены графики с характерным суточным ходом значений электрического поля на высокогорной станции для разных сезонов. Главная особенность суточного хода – отсутствие унитарной вариации (кривая Карнеги), которое обусловлено расположением станции в глубине материка. Унитарная вариация не обнаружена ни на одной реализации на всем периоде измерений электрического поля на станции (2005-2009 гг) двумя установками. Высокогорное расположение станции в данном случае не является условием ее выделения, как утверждается в [5].

Другим характерным свойством суточной вариации квазистатического электрического поля на высокогорной станции в условиях хорошей погоды является наличие бухтообразного понижения E_z в освещенное время суток, (рисунок 2). Глубина бухты $\sim 100 \div 200$ В/м. Прослеживается явная сезонная зависимость ширины (длительности) бухты. Зимой, в период зимнего солнцестояния, длительность бухты минимальна и составляет 3-4 часа. Осенью длительность бухты больше, ~ 9 часов. В период летнего солнцестояния она растянута на еще более длительный период.



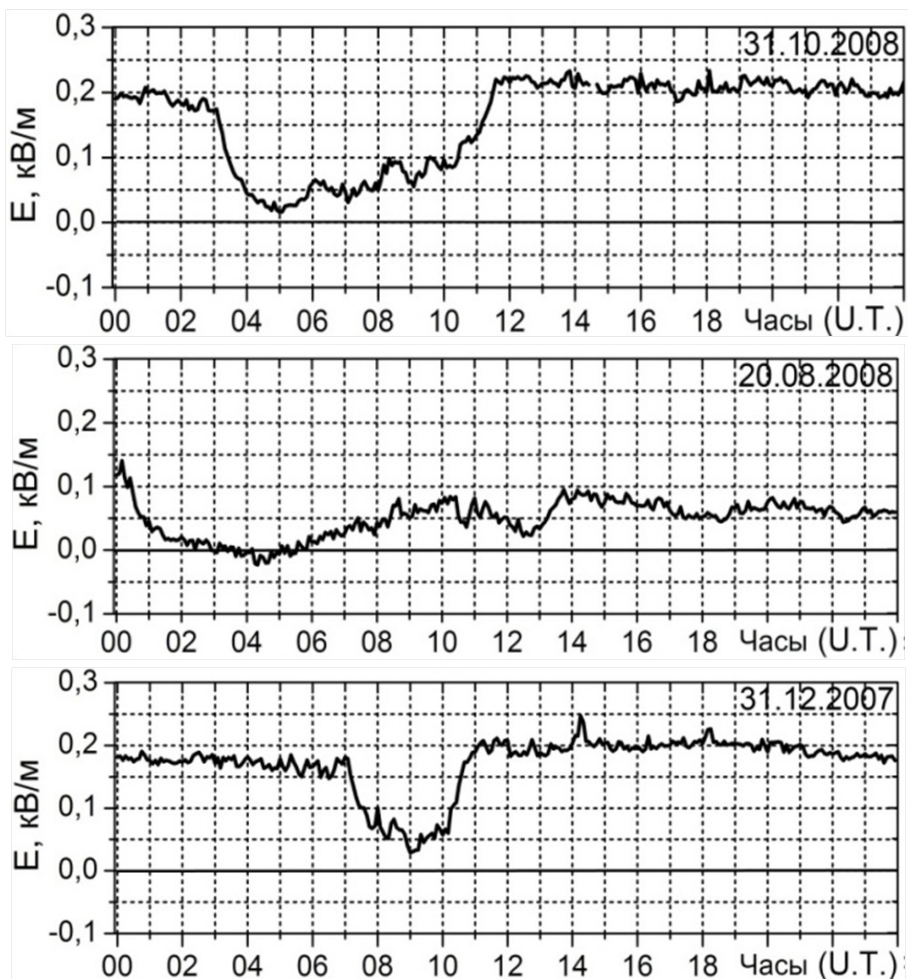


Рисунок 2 – Суточная вариация электрического поля на высокогорной Тянь-Шаньской станции в условиях хорошей погоды в разные сезоны: весна, лето, осень, зима

Среднее значение электрического поля в зимний период значительно выше, чем в летний на 150-200 В/м. Подъем средних значений электрического поля по времени совпадает с наличием снежного покрова на станции. Одним из ионизирующих агентов приземной атмосферы является радон. Зимой поступление радона в атмосферу может быть частично или полностью блокировано смерзанием почвы и снежно-ледовым покровом (настом), вследствие чего уменьшается проводимость атмосферы и увеличивается величина напряженности электрического поля. Эти наблюдения совпадают с наблюдениями на других станциях, но повышенный фоновый уровень на

Тянь-Шаньской станции регистрируется здесь значительно дольше, поскольку условия, вызывающие его увеличение сохраняются здесь в течение ~ 9 месяцев в году. Наличие минимума в суточном ходе напряженности электрического поля, по-видимому, наоборот связано с увеличением проводимости во время испарительного процесса в освещенное время суток. Зимой этот период значительно короче, чем в другие сезоны, что мы и наблюдаем в сезонном изменении длительности бухтообразного уменьшения напряженности поля.

Грозовые условия.

Во время грозы значения напряженности электрического поля достигают громадных значений и несопоставимы с полем в условиях хорошей погоды. Поэтому грозовая активность является принципиальным препятствием для поиска предвестников землетрясений в этом геофизическом параметре. Однако, вызываемые грозой вариации квазистатического электрического поля легко идентифицируются и ее длительность не столь велика. На высокогорной станции она имеет место, главным образом, в летние месяцы. Записи вариаций квазистатического электрического поля (синяя линия) и его высокочастотной составляющей (зеленые линии), фиксирующей молниевую разряд (return stroke), в грозовых условиях представлены на рисунке 3.

Снегопад.

Рассмотрим особенности вариаций квазистатического электрического поля на высокогорной Тянь-Шаньской станции во время снегопада. На рисунке 4а представлены регистрируемые значения электрического поля во время снегопада с сильным ветром (метель). Скорость ветра, по данным метеорологов, в этот период составляла 13-15 м/с. Регистрируемые вариации поля имеют линейчатую структуру в виде положительных кратковременными всплесков, достигающих значений 30 кВ/м. Высокое временное разрешение регистрации электрического поля позволяет увидеть тонкую структуру всплесков и определить их длительность, которая ≤ 1 с (рисунок 4а).

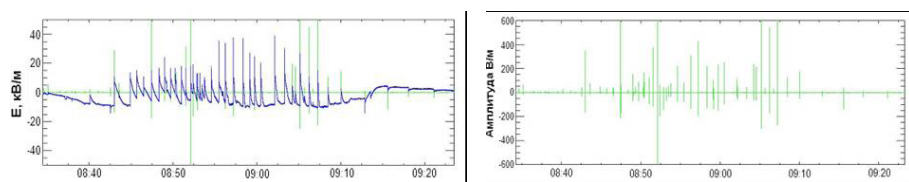


Рисунок 3 – Записи квазистатического электрического поля и его высокочастотной составляющей (левая панель), правая панель – только высокочастотная составляющая поля

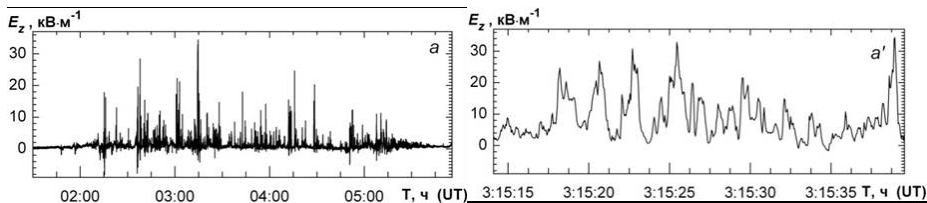


Рисунок 4 – Флуктуации электрического поля во время метели с разным временным разрешением

Наблюдаемая структура флуктуаций электрического поля во время метели обусловлена тем, что снежинки сильно электризуются, и датчик показывает локальное значение поля, определяемое пролетающими мимо регистрирующих пластин зарядами, на фоне среднего поля облака. Снежинка, имеющая потенциал в 100 В и более, пролетая в 1 см от пластин, дает поле в несколько кВ/м. Небольшая длительность всплеска поля связана с быстрым пролетом снежинок мимо датчика и зависит от скорости ветра. Так при скорости ветра 15 м/с прибор длиной 15 см снежинка пролетает за 10 мс. Регистрируемые флуктуации атмосферного электрического поля в данном случае являются ложными.

Дождь, «мокрый» снег.

Вариации приземного электрического поля, регистрируемые установкой «ELIS-TS», во время дождя могут достигать значений $\pm 7\div 8$ кВ/м (рисунок 5, левая панель).

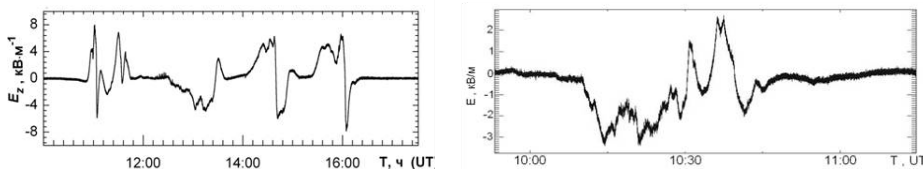


Рисунок 5 – Флуктуации электрического поля во время дождя (левая панель) и мокрого снегопада (правая панель)

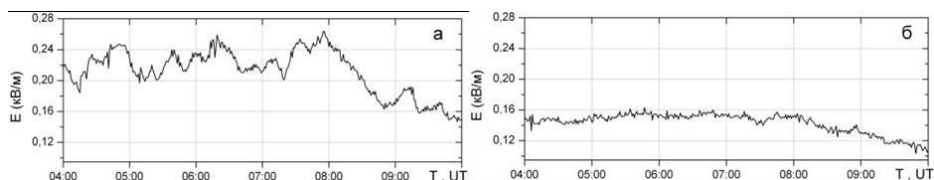
По визуальным наблюдениям в течение периода, представленного на рисунке, над станцией отмечалась низкая облачность, морозящий дождь, штиль, грозы не было. Возмущения поля сохраняются в течение всего периода выпадения осадков. Переход от одной полярности электрического поля к другой довольно быстрый (от нескольких секунд до 10-15 мин) и отличается от изменений приземного электрического поля при прохождении электрически заряженного облака без выпадения осадков. Поскольку заряд облака быстро изменяться не может, то

импульсы вызываются явлениями, происходящими вблизи прибора, в частности, пролетом заряженных капель или групп капель, как и в случае снегопада.

Во время «мокрого» снегопада (температура приземного воздуха выше нуля, но снежинки не успевают полностью растаять) на высокогорной станции весной, летом или осенью вариации электрического поля могут иметь как положительные значения, так и отрицательные, рисунок 4 (правая панель). Временное распределение значений электрического поля в этот период незначительно отличается от распределения во время дождя.

Туман.

С целью идентификации возмущений приземного электрического поля, обусловленных туманом, по данным регистрации погодных условий на высокогорной станции были выбраны периоды с низким плотным туманом. Фактически эти метеоусловия соответствуют опусканию облачности до уровня станции и ниже (уровень Большого Алма-Атинского озера). На рисунке 6 представлены записи электрического поля близкие по времени во время хорошей погоды 23.03.2010 г и во время тумана 18.03.2010 г. Видно, что средние значения напряженности электрического поля во время тумана значительно меньше, чем в условиях хорошей погоды на ~ 70 В/м.



а - во время хорошей погоды,

б - во время тумана

Рисунок 6 – Флуктуации электрического поля

По мере конденсации пара увеличиваются концентрация и размер капель воды (или льда) в тумане, следствием этого является перенос заряда на малоподвижные капли и к изменению проводимости и, как следствие, к изменению напряженности электрического поля.

Особенности вариаций электрического поля в периоды активизации сейсмических процессов. Для исследования вариаций электрического поля, обусловленных причинами литосферного происхождения, установка «ELIS-TS» была дополнена блоком, позволяющим усиливать слабые флуктуации в 30-40 раз,

и включена в непрерывный круглогодичный режим регистрации с просмотром базовых данных электрического поля в реальном времени на удаленных компьютерах. В исследованиях используется, главным образом, второй датчик установки, измеряющий квазистатическое электрическое поле. На рисунке 7 приведена, для примера, запись квазистатического электрического поля (синяя линия) и его высокочастотной составляющей (зеленая линия) 1 мая 2011 года. Красной стрелкой отмечен момент главного толчка землетрясения с магнитудой 5,4, который произошел 1 мая в 2:31 UT на расстоянии 77.7 км в северо-восточном направлении от Алматы. По данным метеорологов на высокогорной Тянь-Шаньской станции 1 мая 2011 года наблюдалась хорошая погода. В этих условиях значения приземного электрического поля весной не превышают 200 В/м (рисунок 2). В данном случае, значения электрического поля на порядок выше, чем должны быть в условиях «хорошей погоды».

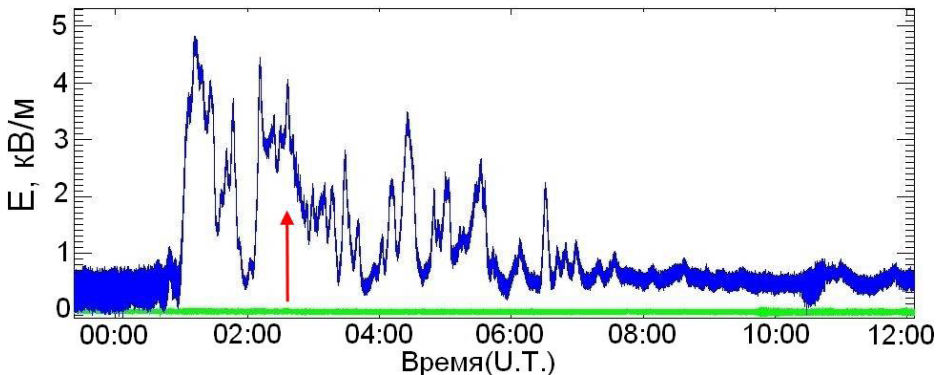


Рисунок 7 – Вариации приземного электрического поля 1 мая 2011 г, красная стрелка указывает момент землетрясения с магнитудой 5.4

Более детальный анализ вариаций атмосферного электрического поля для этого случая, а также для ряда других землетрясений, позволяет заключить, что за счет источников литосферного происхождения в вариациях квазистатического поля возникают, в основном, положительные аномалии.

Работа выполнена по РБК 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать взаимосвязь динамических процессов в атмосфере с процессами естественного и антропогенного происхождения на Земле».

Литература

1. Руководящий документ РД 52.04.168-2001 Методические указания. Наблюдения за электрическим полем//С.-Петербург: Гидрометеоиздат. – 2002. – 58 с.
2. Антонова В.П., Дробжсев В.И., Крюков С.В. Организация наземных экспериментов по регистрации квазистатического электрического поля (Е) и высокочастотных флуктуаций dE/dt поля от молниевых разрядов//Казахстанские космические эксперименты. Алматы. – 2007. – С. 42-50.
3. Бузевич А.В., Смирнов С.Э., Филимонов В.И., Фирстов П.Т. Специализированный аппаратно-программный комплекс (АПК) сбора и обработки геофизической информации обс. Паратунка//Тезисы докладов Международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 1998. – С. 36-38.
4. Смирнов С.Э. Динамические характеристики вертикальной компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке// Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Москва: ИКИРР ДО РАН. – 2007. – 104 с.
5. Алешков В.М., Коваленко В.А., Молодых С.И., Шаманский Ю.В. Исследование атмосферного электричества на высокогорных станциях // Сборник трудов Шестой Российской конференции по атмосферному электричеству. Н-Новгород. – 2007. – С. 41-42.

О СОСТОЯНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ

Ляхов В.В., Нецадим В.М.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Развита кинетическая теория равновесия неэлектронейтральных токовых слоев, образующихся при произвольных значениях параметров среды. Дано обобщение равновесной функции распределения токового слоя (функции Харриса), учитывающее анизотропию температуры плазмы вдоль и поперек слоя. Получено неэлектронейтральное равновесное решение для токового слоя хвоста магнитосферы. Исследован эффект поляризации плазмы без каких-либо ограничений в широком диапазоне значений параметров.

Область применения результатов: физика магнитосферы, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: МАГНИТОПАУЗА, ХВОСТ МАГНИТОСФЕРЫ, ТОКОВЫЙ СЛОЙ

Кез келген маңызды параметрлік ортада құрастырылатын электронейтральдық емес ток қабатының тепе теңдік кинетикалық теориясы дамытылған. Плазманың бойлай және кесе-көденең қабатының температуралық анизотропиясын ескере отырып, ток қабатының таратылу тепе-теңдік функциясын (Харрис функциясы) талдап қорыту берілген. Магнитосфералық шектің ток қабаты үшін электронейтральдық емес тепе-теңдік шешімі алынды. Кең көлемді мәндік параметрлерде плазманың шексіз поляризациялық әсері зерттелген.

Нәтижелерді қолдану аумағы: магнитосфера физикасы, жер-сәулелік физика.

Кілттік сөздер: СӘУЛЕЛІК ЖЕЛ, МАГНИТОПАУЗА, МАГНИТТІК ҚАЙТА ҚОСУ.

A kinetic theory of the balance of non-electroneutral current layers formed at arbitrary values of the parameters of the medium is developed. The generalization of the equilibrium distribution function of the current sheet (Harris function) that takes into account the anisotropy of the plasma temperature along and across the layers is made. Non-electroneutral equilibrium solution for the current sheet of the magnetotail is obtained. The effect of polarization of the plasma without any limitation in a wide range of values is investigated.

The area of application of the results: the physics of the magnetosphere, solar-terrestrial physics.

Keywords: MAGNETOPAUSE, THE MAGNETOTAIL, THE CURRENT SHEET

Введение

Теоретическое исследование вопросов пересоединения и диссипации магнитного поля в магнитонейтральных токовых слоях распадается на две стадии: во-первых, поиск равновесного (стационарного) решения для слоя токовой плазмы, разделяющей области с антипараллельными магнитными полями и, во-вторых, исследование устойчивости полученной равновесной пограничной конфигурации. Неустойчивость её относительно некоторых мод и, прежде всего, относительно тиринг-моды, может приводить к пересоединению силовых линий магнитного поля. Вначале полагали, что тиринг-неустойчивость является основным механизмом дестабилизации бесстолкновительных слоев типа Харриса [1,2]. Однако последующие теоретические исследования [3,4] показали, что учет нормальной к слою компоненты магнитного поля изменяет энергетический баланс системы и спонтанное развитие неустойчивости становится энергетически невыгодным. Одним из направлений исследований динамики токовых слоев сейчас является поиск таких физических процессов, которые бы облегчали развитие тиринг- и других неустойчивостей. Изучаются неустойчивости токовых слоев под действием таких возмущений как: изгибающая, баллонная, комбинированная, дрейфовая моды [5-12]. Построены модели анизотропных тонких токовых слоев (ТТС), когда потоковая скорость плазмы U превышает тепловую скорость v_T [13-14].

Обобщение функции распределения Харриса проводится в работе [15]. Во всех цитированных работах процесс поляризации резко неоднородной магнитоактивной плазмы токового слоя не рассматривается. И только некоторые статьи, например [16-18], посвящены исследованию процесса поляризации плазмы токового слоя. Однако исследование ограничено рамками приближения квазинейтральности. В этом приближении электрический потенциал не полагается а priori равным нулю, но находится из условия равенства плотностей электронов и ионов:

$$n_e(A_y(z)) \phi(z) = n_i(A_y(z)) \phi(z) \quad (1)$$

Из этого соотношения можно выразить электрический потенциал через

магнитный $\phi(z) = \phi(A_y(z))$ и решить затем оставшееся уравнение для магнитного потенциала. Однако, условие (1) – это ограничение, накладываемое на плазму. Условие квазинейтральности хорошо выполняется при низких температурах и малых скоростях макроскопических потоков плазмы и хуже при высоких температурах и скоростях. В строгом смысле электронейтральное приближение является нулевым приближением метода сингулярных возмущений. Малым параметром для тепловой плазмы является отношение температуры электронов или ионов к энергии покоя соответственно электрона или иона. Нахождение следующего, уточняющего, первого приближения технически невозможно. Так, нельзя сделать никакого вывода о возможности пространственного разделения точек отражения компонент плазмы, определяемых основным соотношением метода квазинейтральности (1) в нулевом приближении. Следует отметить, что в истории изучения структуры неоднородных конфигураций магнитоактивной плазмы предпринимались попытки исследования эффекта поляризации в полной мере, вне границ приближения квазинейтральности [19-22]. Так, в работе [19] было показано, что с увеличением скорости налетающего на магнитную стенку потока плазмы усиливается поляризация плазмы пограничного слоя и электрическое поле поляризации в области отражения частиц растет. Однако, вопрос поляризации токовых слоев и влияния электрического поля поляризации на их равновесие остается открытым.

Нами развита кинетическая теория равновесия неэлектронейтральных токовых слоев, образующихся при произвольных значениях параметров среды. Дано обобщение равновесной функции распределения токового слоя (функции Харриса), учитывающее анизотропию температуры плазмы вдоль и поперек слоя. Получено неэлектронейтральное равновесное решение для токового слоя хвоста магнитосферы. Исследован эффект поляризации плазмы без каких-либо ограничений в широком диапазоне значений параметров.

1. Постановка задачи

Пусть в плоскости $z=0$ (см. рис. 1) сосредоточена плазма, а в верхнем и нижнем полупространствах – антипараллельные магнитные поля. В этой плоскости образуется самосогласованный токовый слой, разделяющий области с антинаправленными магнитными полями.

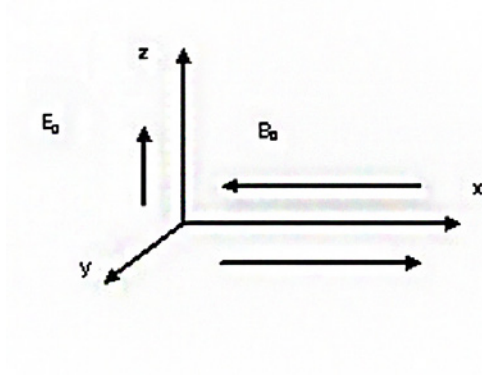


Рисунок 1 – Система координат для токового слоя

Задача одномерна, все величины зависят от переменной z . Исследуемая среда описывается системой из кинетического уравнения

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + e_\alpha \left\{ \vec{E} + [\vec{v} \vec{B}] \right\} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{P}_\alpha} = 0 \quad (2)$$

и уравнений Максвелла с самосогласованным электромагнитным полем (внешние источники отсутствуют) нешние источники ласованным эле (1) уравнением

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{B} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \vec{j}, \text{div} \vec{B} = 0, \\ \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_\alpha e_\alpha \int \delta f_\alpha d\vec{P} \\ \vec{j} &= \sum_\alpha e_\alpha \int \vec{v} \delta f_\alpha d\vec{P} \end{aligned} \quad (4)$$

Задача (2),(3) решается методом теории возмущений

$$f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, z, t) = f_{0\alpha}(\vec{P}) + \check{a} f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, z, t)$$

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, z, t) &= \vec{E}_0(z) + \ddot{a}\vec{E}(\vec{r}, z, t) \\ \vec{B}(\vec{r}, z, t) &= \vec{B}_0(z) + \ddot{a}\vec{B}(\vec{r}, z, t)\end{aligned}\quad (5)$$

Равновесная функции распределения конструируется как функция от интегралов движения $f_{0\alpha}(\vec{P}) = f_{0\alpha}(W_\alpha, P_{y\alpha})$, где полная энергия и обобщенный импульс имеют вид:

$$\begin{aligned}W_\alpha &= \frac{1}{2}m_\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + e_\alpha\phi(z) \\ P_{y\alpha} &= m_\alpha v_y + e_\alpha A_y(z)\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь $\phi(z)$ $A_y(z)$ - электрический и магнитный потенциалы

$$(\vec{E}_0 = -\text{grad}\phi, \vec{B}_0 = \text{rot}\vec{A}).$$

Для описания равновесия токового слоя обобщим функцию распределения Харриса [1], а именно, введем анизотропию температур компонент плазмы вдоль и поперек слоя:

$$f_{0\alpha} = \frac{m_\alpha}{2\theta_{\alpha z}} n_0 (1 + \alpha_\alpha)^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{m_\alpha}{2\theta_{\alpha z}} (1 + \alpha_\alpha) U_\alpha^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{W_\alpha}{\theta_{\alpha z}} - \frac{\alpha_\alpha P_{y\alpha}^2}{2\theta_{\alpha z} m_\alpha} + U_\alpha (1 + \alpha_\alpha) \frac{P_{y\alpha}}{\theta_{\alpha z}}\right] \quad (7)$$

$$\text{Здесь } \alpha_\alpha = \frac{\theta_{\alpha z}}{\theta_{\alpha y}} - 1 \text{ - степень анизотропии температуры,} \quad (8)$$

$$U_\alpha \text{ - макроскопическая скорость вдоль оси у} \quad (9)$$

Считаем, что на границе:

$$\phi(z=0) = A_y(z=0) = 0 \quad (10)$$

Вычислив плотность частиц и плотность тока для равновесной функции распределения (7), можно получить уравнения для потенциалов:

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} = \exp\left(\frac{\psi}{\gamma} - \frac{\omega_e}{\gamma} a - \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e} \frac{\eta a^2}{2\mu}\right) - \exp\left(-\psi + \omega_i a - \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \frac{\eta a^2}{2}\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 a}{d\xi^2} &= \left(\omega_e + \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e} \frac{\eta a}{\mu}\right) \exp\left(\frac{\psi}{\gamma} - \frac{\omega_e}{\gamma} a - \frac{\alpha_e}{1 + \alpha_e} \frac{\eta a^2}{2\mu}\right) - \left(\omega_i - \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \eta a\right) \cdot \\ &\exp\left(-\psi + \omega_i a - \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \frac{\eta a^2}{2}\right)\end{aligned}\quad (12)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} a(\xi = 0) = a'(\xi = 0) = 0; \\ \psi(\xi = 0) = \psi'(\xi = 0) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Введены следующие безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \mu = \frac{m}{M}, \gamma = \frac{\theta_x}{\theta_i}, \eta = \frac{\theta_i}{M^2}, \psi = \frac{e}{\theta_i} \phi, a = \frac{e}{\theta_i} A_y, \xi^2 = \frac{e^2 n_0}{\theta_i \varepsilon_0} z^2, \\ \omega_i = \frac{U_i}{c}, \omega_e = \frac{U_e}{c}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для получения электронейтрального решения задачи теперь недостаточно только перейти в систему координат, где выполняется условие:

$$\frac{U_e}{\theta_e} = -\frac{U_i}{\theta_i} \quad (15)$$

как это справедливо для решения Харриса. Необходимо также потребовать выполнения условия:

$$\frac{\alpha_e}{(1 + \alpha_e) \theta_e m_e} = \frac{\alpha_i}{(1 + \alpha_i) \theta_i m_i} \quad (16)$$

Электронейтральное решение имеет место только для узкого круга значений параметров, связанных соотношениями (15), (16).

3. Результаты решения. Равновесие токового слоя хвоста магнитосферы

Численное решение задачи (11), (12), (13) реализовано в пакете MAPLE 14 [23]. Для параметров токового слоя хвоста магнитосферы:

$$\begin{aligned} \cdot 10^{-3}; \alpha_e = 5.5 \cdot 10^{-8}; \theta_i = 1.6 \cdot 10^{-15} \text{ Ae}; \gamma = 1 \cdot 10^{-1}; \eta = 1.07 \cdot 10^{-3}; \\ .234 \cdot 10^{-3}; \omega_i = 0.234 \cdot 10^{-2}; \mu = 0.00055; n_0 = 0.16 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3} \end{aligned} \quad (17)$$

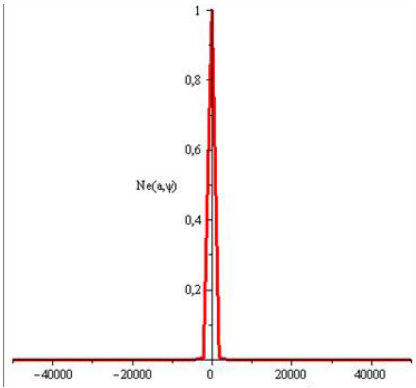
решение представлено на рисунках 2 и 3. На рисунке 2а представлен профиль плотности электронов, на рис. 2б – профиль плотности тока электронов, на рис. 2в – профиль плотности ионов, на рис. 2г - профиль плотности тока ионов, на рис. 2д - профиль разности плотностей электронов и ионов, на рис. 2е – профиль разности плотностей токов электронов и ионов. Все величины и расстояние приведены в безразмерном виде. Профили магнитного и электрического полей для удобства восприятия представлены на рис. 3а,б в размерном виде. Толщина слоя Δ составляет ≈ 15000 км, т.е. этот незлектронейтральный слой относится к классу “толстых”, поскольку $\Delta / R_c = 2.4$, где радиус Земли $R_3 = 6374$ км. Удобнее перейти в ту систему координат, где электрическое поле на бесконечности равно нулю. Эта система K'' движется по оси y относительно лабораторной

системы координат K со скоростью $v^* = -\frac{E(\infty)}{B(\infty)} = -47012$ м/с и является аналогом харрисовской системы, с той разницей, что у Харриса реализуется частная и исключительная ситуация: электрическое поле всюду отсутствует $\phi(z) = 0$. Преобразовав соответствующим образом задаваемые тангенциальные скорости компонент плазмы

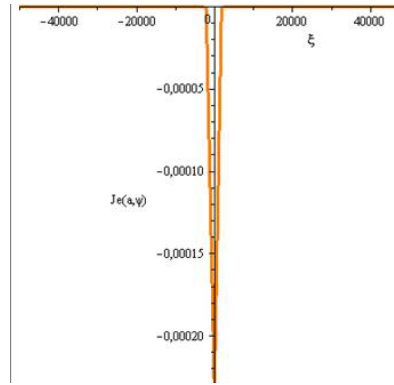
$$\omega'_e = \omega_e - \frac{v^*}{c}, \quad \omega'_i = \omega_i - \frac{v^*}{c} \quad (18)$$

получим в лабораторной системе координат нулевое на бесконечности электрическое поле. Назовем эту систему координат привилегированной. На рис. 4а,б представлены профили размерных магнитного и электрического полей в привилегированной системе координат.

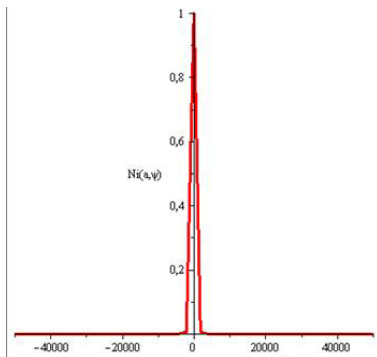
Для описания токового слоя предпочтение следует отдать равновесной функции распределения (7), потому что это распределение позволяет описывать более общую ситуацию, когда температуры компонент плазмы токового слоя анизотропны. Функция Харриса является частным случаем введенной функции распределения (7). Равновесие токового слоя в общем случае, когда параметры плазмы не удовлетворяют условиям (15), (16), является незлектронейтральным. Малейшее отступление от этих условий ведет к возникновению поляризованного электрического поля.



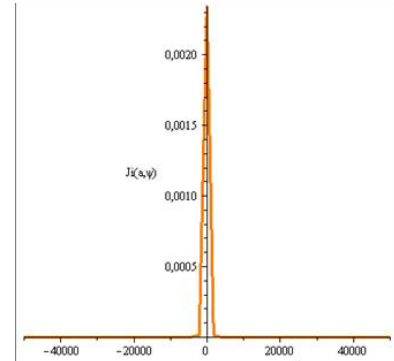
а



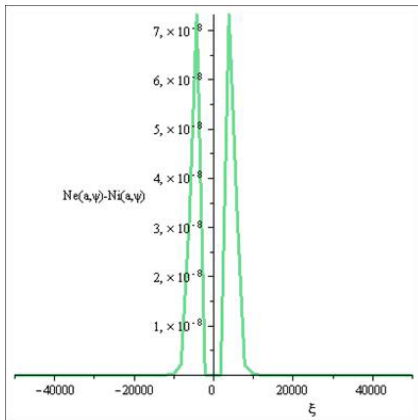
б



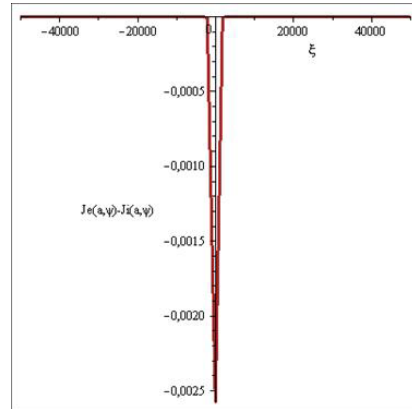
в



г



д



е

Рисунок 2 – Профили плотности электронов (а), электронного тока (б), ионов (в), ионного тока (г), разности плотностей электронов и ионов (д), разности токов электронов и ионов (е)

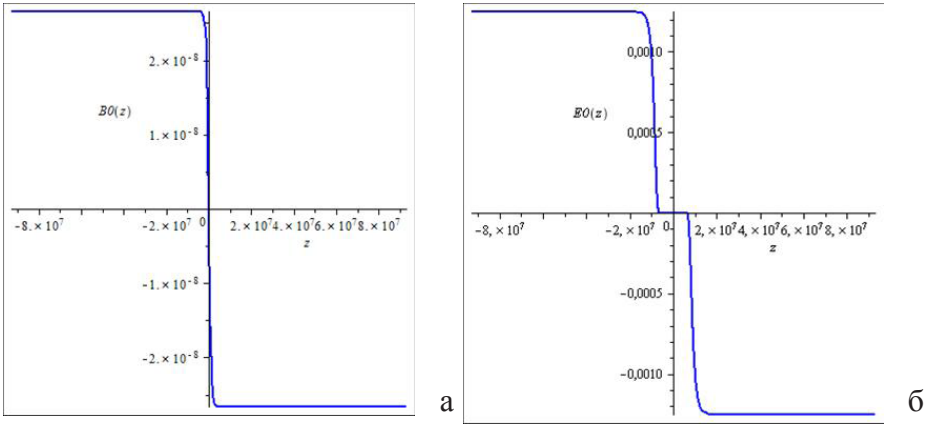


Рисунок 3 – Профили индукции магнитного поля (а), электрического поля (б)

Можно сказать, что в природе реализуются только неэлектронейтральные токовые слои. Исследована структура токового слоя хвоста магнитосферы с учетом эффекта поляризации плазмы, получены профили поляризационного электрического поля. Это поле необходимо учитывать при исследовании устойчивости токового слоя.

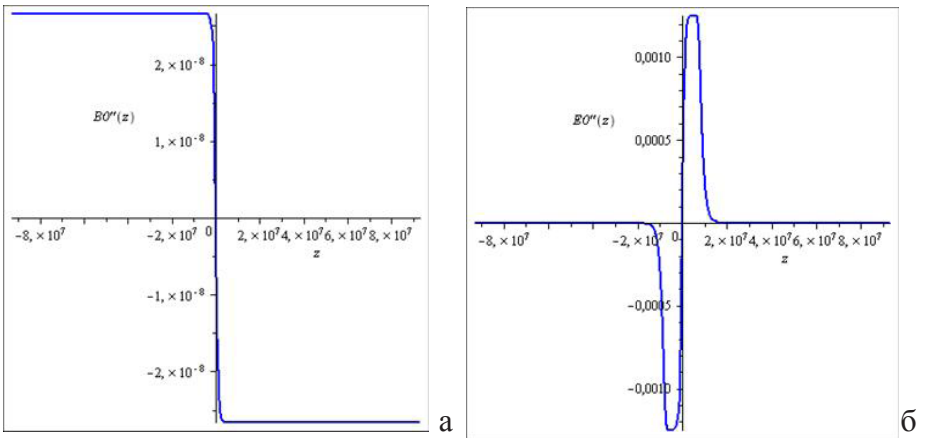


Рисунок 4 – Профили индукции магнитного поля (а) и напряженности электрического поля (б) в привелигированной системе

координат

4. Исследование неустойчивости токового слоя в линейном приближении

4.1 Определение неравновесной функции распределения δf_α

Зная равновесную функцию распределения (7) и равновесные электрическое и магнитное поля, можно получить из исходного уравнения Власова (2) уравнение для определения неравновесной добавки к функции распределения

$$\frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial \vec{r}} + e_\alpha \{ \vec{E}_0 + [\vec{v} \vec{B}_0] \} \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial \vec{P}_\alpha} = -e_\alpha \{ \delta \vec{E} + [\vec{v} \delta \vec{B}] \} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \vec{P}_\alpha} \quad (19)$$

Зависимость всех возмущенных величин от времени и координат представим в виде плоских волн:

$$\begin{aligned} \delta f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, z, t) &= \delta f_\alpha(\vec{P}, \omega, \vec{k}, z) \exp(-i\omega t + k_x x + k_y y) \\ \delta \vec{E}(\vec{r}, z, t) &= \delta \vec{E}(\omega, \vec{k}, z) \exp(-i\omega t + k_x x + k_y y) \\ \delta \vec{B}(\vec{r}, z, t) &= \delta \vec{B}(\omega, \vec{k}, z) \exp(-i\omega t + k_x x + k_y y) \end{aligned} \quad (20)$$

После подстановки разложений (20) в уравнение (19) получим уравнение для Фурье-амплитуд:

$$-i(\omega - \vec{k}\vec{v})\delta f_\alpha + v_z \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial z} + e_\alpha \{ \vec{E}_0 + [\vec{v} \vec{B}_0] \} \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial \vec{P}_\alpha} + e_\alpha \delta \vec{E} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \vec{P}_\alpha} = 0 \quad (21)$$

В пространстве импульсов перейдем, как обычно, к цилиндрической системе координат P_\perp, φ, P_x ($P_y = P_\perp \cos \varphi, P_z = P_\perp \sin \varphi$), тогда последнее уравнение примет вид:

$$\frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial \varphi} - \frac{e_\alpha E_{0z} \sin \varphi}{\Omega_\alpha(z)} \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial P_{\alpha\perp}} - \frac{v_z}{\Omega_\alpha(z)} \frac{\partial \delta f_\alpha}{\partial z} = -\frac{i(\omega - \vec{k}\vec{v})}{\Omega_\alpha(z)} \delta f_\alpha + \frac{e_\alpha}{\Omega_\alpha(z)} \delta \vec{E} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \vec{P}_\alpha} \quad (22)$$

Здесь была использована формула

$$E_{0\perp} = E_{0z} \sin \varphi \text{ и введена ларморовская частота } \Omega_\alpha(z) = \frac{e_\alpha B_0(z)}{m_\alpha}.$$

Уравнение (22) представляет собой неоднородное уравнение в частных производных первого порядка. Решение его есть:

$$\delta f_\alpha = \frac{e_\alpha}{\Omega_\alpha(z)} \int_\infty^\varphi (\delta \vec{E} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \vec{P}_\alpha})_{\varphi'} \exp\left[-\frac{i}{\Omega_\alpha(z)} \int_\varphi^{\varphi'} (\omega - \vec{k}\vec{v})_{\varphi''} d\varphi''\right] d\varphi'. \quad (23)$$

Т.о. применение метода возмущений к кинетическому уравнению с самосогласованным полем (2) позволило последовательно найти равновесную функцию распределения (7) и неравновесную добавку к ней (23). На основе равновесной функции распределения строится теория равновесия токового слоя. Неравновесную добавку к функции распределения можно положить в основу исследования устойчивости токового слоя.

4.2 Вычисление тензора диэлектрической проницаемости

Подставив найденную неравновесную поправку к функции распределения

δf_α (23) в уравнение для индуцированной в плазме плотности тока

$\vec{j} = \sum_\alpha e_\alpha \int \vec{v} \delta f_\alpha d\vec{P}$ получим следующее выражение для плотности тока:

$$j_i = \sum_\alpha \frac{e_\alpha^2}{\Omega_\alpha(z)} \int d\vec{P} v_i \int_\infty^\varphi d\varphi' (\delta E_j \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial P_j})_{\varphi'} \exp[\frac{i}{\Omega_\alpha(z)} \int_\varphi^{\varphi'} d\varphi'' (\omega - \vec{k}\vec{v})_{\varphi''}] \quad (24)$$

и используя материальное уравнение среды в виде

$$j_i = \sigma_j \delta E_j \quad (25)$$

можно вычислить тензор проводимости σ_j , а затем, воспользовавшись формулой

$$\varepsilon_j = \delta_j + \frac{i}{\varepsilon_0 \omega} \sigma_j \quad (26)$$

можно рассчитать тензор диэлектрической проницаемости [24]. В Приложении 1 приведена одна из девяти компонент тензора.

4.3 Дисперсионное уравнение для исследования тиринг-неустойчивости токового слоя

Исследование амплитудно-частотных характеристик возмущений токового слоя основывается на решении уравнений Максвелла для возмущений электромагнитного поля, замкнутых материальным уравнением. Для описания тиринг-неустойчивости наряду с введенными черенковским и циклотронным взаимодействиями рассматриваемых собственных мод с частицами

магнитоактивной плазмы токового слоя необходимо ввести адиабатное возмущение тока и соответственно магнитного поля из-за слипания токовых нитей. Эта процедура описана в работе [24], полученное дисперсионное уравнение представляет собой:

$$[-Q \cdot \delta_x \cdot \delta_y + i\omega(k^2 \delta_j - k_i k_j - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_j(\omega, \vec{k}))] = 0 \quad (27)$$

Это уравнение описывает собственные тиринг-моды, развивающиеся в электронейтральном токовом слое.

4.4 Исследование тиринг-неустойчивости электронейтрального токового слоя хвоста магнитосферы

Исследование проведено на основе численного решения дисперсионного уравнения (27). Это уравнение является трансцендентным алгебраическим уравнением. Решалась начальная задача: для заданных действительных значений волнового вектора \vec{k} находились комплексные значение частоты ω . Поперечная

компонента волнового вектора на данном этапе полагалась равной нулю $k_y = 0$.

Решение уравнения (27) реализовано в среде пакета MAPLE-14. Расчеты проведены для параметров токового слоя хвоста магнитосферы для сечения $z = 7 \cdot 10^5 m$:

$$m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, m_i = 1836 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, \theta_i = 1.6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}, \theta_e = 1.6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \quad (28)$$

$$e_i = -e_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, n_{oe} = n_{oi} = 0.16 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}.$$

Расчеты проведены для случая отсутствия процесса поляризации:

$$\alpha_e = \alpha_i = 0,$$

$$U_i = 1 \quad 0^6 \text{ i/c}, U_e = -\frac{\theta_e}{\theta_i} U_e = -1 \quad 0^5 \text{ i/c}. \quad (29)$$

Корни группируются в 2 ветви или моды. Обе моды имеют положительные мнимые части частоты и существуют на всем интервале волновых чисел. На рисунке 5а представлена дисперсионная кривая для мнимой частоты первой моды на начальном интервале. На рисунке 5б представлено то же для второй моды.

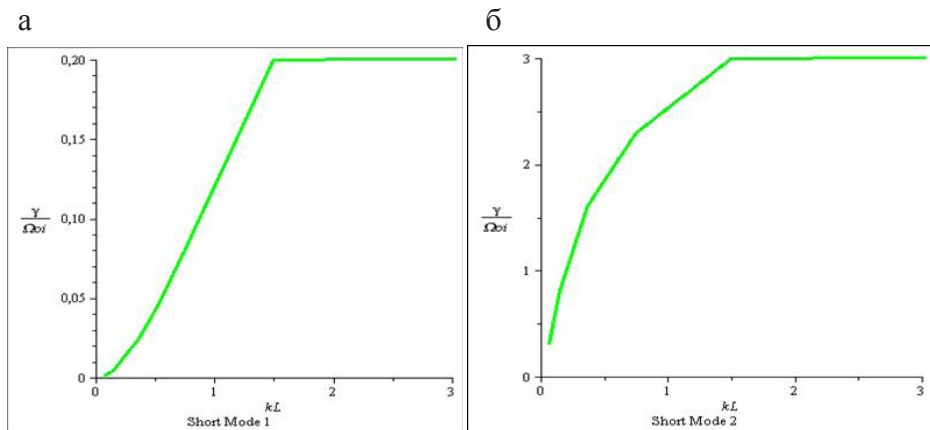


Рисунок 5 – Дисперсионная кривая 1-ой тиринг-моды ($z=-7 \cdot 10^3 m$) (а) и 2-ой тиринг-моды ($z=-7 \cdot 10^3 m$) (б)

Значения инкремента нарастания первой моды на начальном интервале $kL < 1$ совпадают по величине со значениями [25, 26], а затем растут и выходят на плато. Инкремент нарастания второй моды значительно больше и растет с увеличением волнового числа.

Поскольку в прежней теории разрывной неустойчивости взаимодействия волна – частица по циклотронному каналу вообще не рассматривалось, то результаты развиваемой здесь теории, учитывающей это взаимодействие, можно сопоставить с прежними результатами, проводя вычисления в сечении, близком к магнитонейтральной плоскости, где магнитное поле пренебрежимо мало. Проведены расчеты для сечения $z=-7 \cdot 10^2 m$, близкого к магнитонейтральной плоскости.

Дисперсионная картина в этом сечении гораздо более сложная, корни группируются в 6 мод. На начальном интервале $kL < 1$ имеются только 2 моды с положительным инкрементом нарастания. После точки $kL = 1$ наряду с двумя положительными (в смысле $\gamma > 0$) модами появляются две отрицательные. Кроме этих двух в области $kL = 75.2$ появляются еще две отрицательные моды. Наконец, в области $kL = 150.4$ остаются только отрицательные моды.

Для примера, на рисунке 6 представлена дисперсионная кривая для мнимой частоты первой моды на начальном интервале. При условии $kL < 1$, как и в прежней теории разрывной неустойчивости инкремент нарастания только положителен, а в области $kL > 1$ появляются отрицательные моды, хотя

сохраняются и положительные, в то время как в прежней теории знак инкремента нарастания менялся в точке $kL = 1$ с положительного на отрицательный (см., например, [25]). В работе [26] исследован интервал $0.1 < kL < 0.5$; инкремент нарастания тиринг-мод в этом интервале положителен и медленно растет до значения $\frac{\gamma}{\Omega_{0i}} \approx 0.06$. В модели [27] инкремент нарастания тиринг-мод обладает максимумом $\frac{\gamma}{\Omega_{0i}} \approx 0.17$ при $kL \approx 1$ и уменьшается до нуля при $kL \approx 1$.

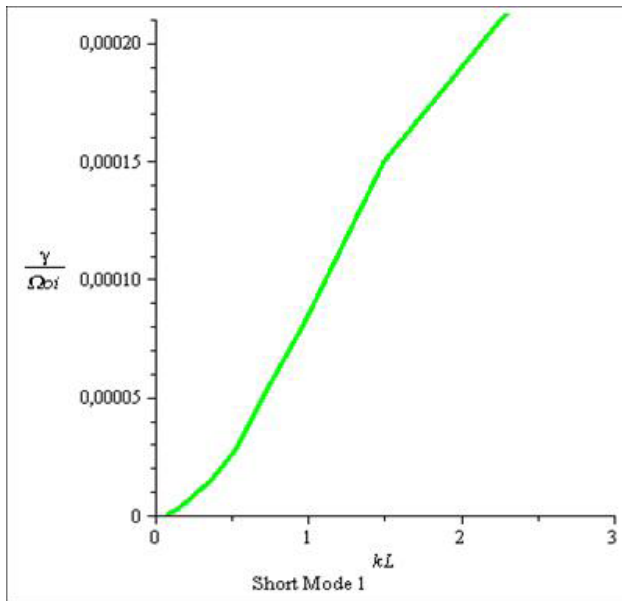


Рисунок 6 – Дисперсионная кривая 1-ой тиринг-моды ($z = -7 \cdot 10^2 m$)

Результаты расчета показывают, что в обоих сечениях электронейтрального токового слоя имеются низкочастотные тиринго-подобные собственные моды с большим положительным инкрементом нарастания, и существуют эти моды в очень широком интервале длин волн.

4.5 О влиянии поляризации плазмы токового слоя на тиринг-неустойчивость

Заложим теперь в расчет тиринг-неустойчивости параметры неэлектронейтрального токового слоя хвоста магнитосферы

$$\alpha_i = 1.0 \cdot 10^{-3}; \alpha_i = 5.5 \cdot 10^{-8}; \theta_i = 1.6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}; \gamma = 1 \cdot 10^{-1}; \eta = 1.07 \cdot 10^{-5};$$

$$\omega_e = -0.234 \cdot 10^{-3}; \omega_i = 0.234 \cdot 10^{-2}; \mu = 0.00055; n_0 = -0.16 \cdot 10^6 m^{-3} \quad (30)$$

При этом в привилегированной системе координат K'' поляризационное электрическое поле токового слоя достигает максимального значения 0.0012 В/м где-то в сердцевине слоя при $z^{**} = -4.11 \cdot 10^6 \text{ м}$. Заряженный токовый слой является толстым и слабоанизотропным.

Перейдем в систему координат, движущуюся относительно привилегированной системы K'' с такой скоростью $v^{**} = -\frac{E''_{0z}(z^{**})}{B''_0(z^{**})} = 4,75 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ по

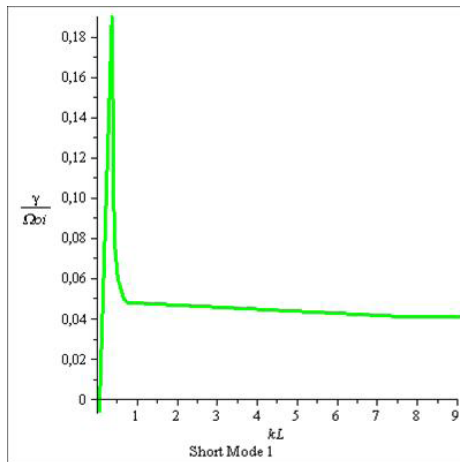
оси u , что электрическое поле в ней $E'_{0z}(z^{**}) = 0$. В этом случае можно воспользоваться дисперсионным уравнением (27) для исследования тиринг-неустойчивости в этой точке $z^{**} = -4.11 \cdot 10^6 \text{ м}$. При этом необходимые для решения уравнения (27) в системе K' значения магнитного поля $B'_0(z^{**})$ и электромагнитных потенциалов $\phi'_0(z^{**})$ и $A'_y(z^{**})$ пересчитываются из системы координат K'' . С помощью релятивистского преобразования частот ω и волновых векторов \vec{k} рассчитанная таким образом дисперсионная кривая переводится обратно в привилегированную систему K'' .

Результаты исследования тиринг-неустойчивости в поляризованном токовом слое по предложенной методике свидетельствуют о том, что в сердцевине токового слоя, а именно при $z^{**} = -4.11 \cdot 10^6 \text{ м}$ разрывная неустойчивость вообще отсутствует (среди корней дисперсионного уравнения (27) нет тирингообразных с малой действительной частью). Тиринг-возмущение может развиваться ближе к магнитонейтральной плоскости. Расчеты проведены для сечения $z^{**} = -10^5 \text{ м}$.

Корни группируются в 2 моды. На рисунке 7а, б представлены дисперсионные кривые инкрементов нарастания обеих мод на начальном участке. В обеих модах инкременты нарастания переходят от отрицательных значений к положительным, переходя через локальный максимум. Инкременты второй моды достигают больших значений и максимум кривой сдвинут вправо относительно максимума дисперсионной кривой первой моды. Вследствие эффекта поляризации область существования этих низкочастотных тиринго-подобных мод вытесняется из области сильного стационарного электрического поля ближе к магнитонейтральной (и электронеutralной) плоскости в центре симметрии токового слоя. Здесь инкременты нарастания обеих вычисленных мод с ростом волнового числа переходят от отрицательных значений к положительным,

переходя через локальный максимум.

а



б

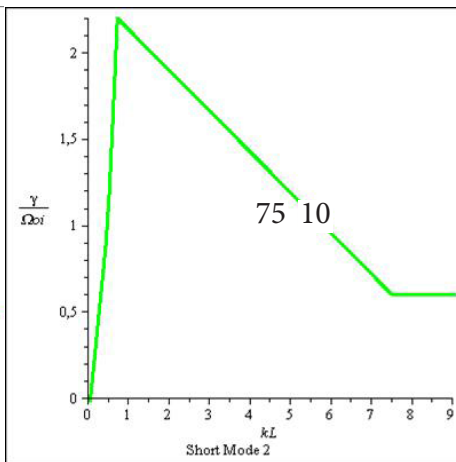


Рисунок 7 – Дисперсионная кривая 1-ой тиринг-моды ($z=-105$ м) (а) и 2-ой тиринг-моды ($z=-105$ м) (б)

Исследование проведено в линейном приближении. Характерные частоты и масштабы тиринг-возмущений заряженного токового слоя хвоста магнитосферы могут быть определены в результате исследования проблемы в нелинейном приближении.

5. Исследование неустойчивости токового слоя в квазилинейном приближении

Дальнейшее исследование можно проводить в рамках слабой турбулентности, когда энергия возникших в результате развития неустойчивости колебаний мала по сравнению с тепловой энергией частиц плазмы

$$\frac{W}{n\varepsilon} < 1 \quad (31)$$

здесь $n\varepsilon$ -тепловая энергия частиц, $W = \sum_k W_k = \sum_k \frac{\varepsilon_0 E_k^2}{2}$ - энергия плазменных

колебаний единицы объема, n - концентрация частиц.

В то же время, считая, что энергия плазменных колебаний намного превышает энергию тепловых флуктуаций электромагнитного поля в плазме, можно получить соотношение

$$\frac{W}{n\varepsilon} > \left(\frac{e^2 n^{\frac{1}{3}}}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (32)$$

Такие колебания представляют собой поле надтепловых осцилляций слаботурбулентной плазмы. В качестве квазилинейных уравнений для медленной (равновесной) части функции распределения и Фурье-амплитуд электрического поля можно воспользоваться выражениями [28]:

$$\frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \mu t} = \frac{\partial}{\partial P_i} D_{\alpha j} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial P_j} \quad (33)$$

здесь

$$D_{\alpha j} = \frac{e_\alpha^2}{2} \sum_k \frac{k_i k_j}{k^2} \frac{E_k E_k^* \delta_k}{(\omega - \vec{k}\vec{v})^2 + \delta_k^2} \quad (34)$$

с учетом того, что введена комплексная частота $\omega \rightarrow \omega + i\delta_k$,

$$\frac{\partial |\vec{E}_k|^2}{\partial \mu t} = 2\delta_k |\vec{E}_k|^2 \quad (35)$$

где

$$\delta_k = -\frac{1}{2} \sum_\alpha \frac{e_\alpha^2 \omega}{\varepsilon_0 k^2} \int \vec{k} \frac{\partial f_{0\alpha}}{\partial \vec{P}} d\vec{P} Jm \frac{1}{\omega - \vec{k}\vec{v}} \quad (36)$$

Уравнения (33) и (35) образуют систему квазилинейных уравнений для собственных колебаний плазмы токового слоя в квазилинейном приближении. Эта система уравнений определяет затухание или нарастание электромагнитного поля и релаксацию усредненной функции распределения в квазилинейном приближении в плазме, находящейся во внешнем магнитном поле. Т.о., становится возможным исследование обратного влияния развивающихся собственных мод токового слоя на равновесную функцию распределения.

Заключение. В прежних исследованиях (например, [25, 29]) из возмущений тока вычислялось возмущение магнитного потенциала, которое было функцией

толщины слоя. А возмущение тока определялось возмущением функции распределения, и на определенном этапе получалось дисперсионное уравнение. Тиринг-возмущение дислоцировалось в окрестности магнитонейтральной плоскости, следовательно не учитывалось циклотронное взаимодействие частиц с волной. Кроме этого, поскольку тиринг-мода низкочастотна, сразу пренебрегалось током смещения.

Нами выбрана более общая схема исследования устойчивости токового слоя. Из найденного возмущения функции распределения вычисляется вначале тензор диэлектрической проницаемости, моделирующая резко-неоднородную среду токового слоя. Затем обычным образом решается система уравнений Максвелла, замкнутая материальным уравнением. Током смещения не пренебрегается. Дисперсионное уравнение следует из требования нетривиальности решений для возмущений электрического поля. Волновые возмущения задаются распространяющимися поперек неоднородности токового слоя. Из общих соображений эти возмущения могут обладать произвольной длиной, никак не связанной с характерной толщиной токового слоя.

В результате применения предложенной методики даже в случае электронейтрального токового слоя выявлено существование низкочастотных тиринго-подобных мод, существенным образом отличающихся от известных ранее тиринг- возмущений. Инкремент нарастания этих мод положителен на очень широком интервале длин волн и достигает гораздо больших величин, чем это полагалось раньше для разрывной неустойчивости.

Как видно, применение развиваемой теории к исследованию равновесия и устойчивости хвоста магнитосферы приводит во многом к альтернативной (по сравнению с электронейтральной моделью, основанной на стационарном распределении Харриса) картине. Это можно объяснить тем, что тиринг-возмущение взаимодействует с частицами плазмы не только по черенковскому каналу в окрестности магнитонейтральной плоскости, как это считалось раньше, но и циклотронным образом в удаленных от этой плоскости магнитоактивных слоях токового слоя.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Изучить структуру и динамику магнитопаузы – пограничного слоя между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли».

Литература

1. *Harris E.G.* On a Plasma Sheath Separating Regions of Oppositely Directed Magnetic Field // *Nuovo Cim.* V. XXIII. –1962, № 1. –P. 115-121.
2. *Coppi B., Laval G., Pellat R.* Dynamics of the Geomagnetic Tail // *Phys. Rev. Lett.* –1966. –Vol. 16, № 26. –P. 1207-1210.
3. *Pritchett P.L., Coroniti F.V., Pellat R.* Collisionless Reconnection in two-dimensional magnetotail equilibria//*J. Geophys. Res.* –1991. –Vol. 96. –P. 11523.
4. *Pritchett P.L., Coroniti F.V.* Formation of thin current sheets during plasma sheet convection //*J. Geophys. Res.* –1995. –Vol. 100. –P. 23551.
5. *Sitnov M.I., Lui A.* Cross-Field current instability as a catalyst of the explosive reconnection in the geomagnetotail // *J. Geophys. Res.* –1999. –Vol. 104, № A4. –P. 6941.
6. *Buchner J., Kuska J.P.* Sausage mode instability of thin current sheets as a cause of magnetospheric substorms//*Ann. Geophysicae.* –1999. –Vol. 17. – P. 604.
7. *Daughton W.* Kinetic theory of the drift kink instability in a current sheet// *J. Geophys. Res.* –1998. –Vol.103. –P. 29429.
8. *Kuznetsova M.M., Hesse M., Winske D.* Kinetic quasi-viscous and bulk flow inertia effects in collisionless magnetotail reconnection//*J. Geophys. Res.* –2001. –Vol. 106, № A3. –P. 3799.
9. *Ситнов М.И., Малова Х.В., Шарма А.С.* К вопросу о линейной устойчивости тиринг-моды в квазинейтральном токовом слое // *Физика плазмы.* –1999. –Т. 25, № 2. –С. 1-10.
10. *Silin I., Buchner J., Zelenyi L.* Instabilities of collisionless current sheets: Theory and simylatios // *Physics of Plasmas.* –2002. –Vol. 9, № 4. –P.35-41.
11. *Зеленый Л.М., Долгоносов М.С., Быков А.А., Попов В.Ю., Малова Х.В.* О влиянии захваченной плазмы на структуру бесстолкновительных тонких токовых слоев// *Космические исследования.* –2002. –Т. 40, № 4. –С. 385-394.
12. *Мингалева О.В., Мингалева И.В., Малова Х.В., Зеленый Л.М.* Численное моделирование плазменного равновесия в одномерном токовом слое с ненулевой нормальной компонентой магнитного поля // *Физика плазмы.* –2007. –Т. 33, № 10. –С. 1-15.
13. *Kropotkin A.P., Domrin V.I.* Theory of a thin one-dimensional current sheet in collisionless space plasma // *J. Geophys. Res.* –1996. –Vol. 101. –P. 19893.
14. *Sitnov M.I., Zelenyi L.M., Malova H.V., Sharma A.S.* Thin current sheet embedded within a thicker plasma sheet; Self-consistent kinetic theory//*J. Geophys. Res.* –2000. –Vol. 105. –P. 13029.
15. *Neukirch T., Wilson F., Harrison M.G.* A detailed investigation of the properties of a Vlasov–Maxwell equilibrium for the force-free Harris sheet // *Phys. Plasm.* –2009. –Vol.16. –P. 122102-1 – 122102-10.
16. *Schindler K., Birn J.* Models of two-dimensional embedded thin current sheets from Vlasov theory // *J. Geophys. Res.* –2002. –Vol.107, № A8. –P.1193. 10.1029/2001JA000304.

17. *Birn J., Schindler K.* Thin electron current sheets and their relation to auroral potentials // J. Geophys. Res. –2004. –Vol.109. –P. A02217, doi:10.1029/2003JA010303.
18. *Yoon P.H., Lui A.T.Y.* Model of ion- or electron-dominated current sheet // J. Geophys. Res. –2004. – Vol.109, № A11213, doi:10.1029/2004JA010555.
19. *Шабанский В.П.* Структура переходного слоя между плазмой и магнитным полем// ЖЭТФ. –1961. –Т.40, № 4. –С. 1058-1064.
20. *Sestero A.* Charge Separation Effects in the Ferraro-Rosenbluth Cold Plasma Sheath Model// Phys. Fluids. –1965. –Vol. 8, № 4. –P. 739-744.
21. *Шабанский В.П.* Явления в околоземном пространстве // М. Наука. –1972. –272с.
22. *Ляхов В.В., Шабанский В.П.* О решениях релятивистского уравнения Власова для некоторых равновесных конфигураций плазмы в магнитном поле// Деп. в ВИНТИ. № 7346-85 Деп. –1985. –13с.
23. *Lyahov V.V., Neshchadim V.M.* Kinetic theory of the current sheath. I. On polarization of an equilibrium current sheath// Advances in Space Research. –2012. –V. 50. –P. 318-326.
24. *Lyahov V.V., Neshchadim V.M.* Kinetic theory of the current sheath. II. Effect of polarization on the stability of a current sheath// Advances in Space Research. –2013. –Vol. 51. –P. 730-741.
25. *Dobrovolny M.* Instability of a Neutral Sheet // Nuovo cimento. –1968. –Vol. LVB, № 2. –P. 427-442.
26. *Silin I., Buchner J., Zelenyi L.* Instabilities of collisionless current sheets: Theory and simylatios // Physics of Plasmas. –2002. –Vol. 9, № 4. –P.31
27. *Daughton W.* The unstable eigenmodes of a neutral sheet// Phys. Plasm. –1999. –Vol.6, № 4. –P. 1329-1343.
28. *Александров А.С., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А.* Основы электродинамики плазмы//М.: Высшая школа. –1988. –424с.
29. *Галеев А. А., Судан Р.,* Основы физики плазмы//М. Энергоатомиздат. –1984. –Т. 2. –632 с.

$$\varepsilon_{xx} = 1 - \sum_{\alpha} B_{\alpha} \sum_s \sum_l G_x(s, l, m_{\alpha}, \theta_{\alpha z}, k_{\perp}, \Omega_{\alpha}(z)) I_x(\beta) \quad (\text{П1})$$

$$B_{\alpha} = \frac{2\pi e_{\alpha}^2}{\varepsilon_0 \omega} \left(\frac{m_{\alpha}}{2\pi\theta_{\alpha z}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{n_{0\alpha}}{\theta_{\alpha z}} (1 + \alpha_{\alpha})^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m_{\alpha}}{2\theta_{\alpha z}} (1 + \alpha_{\alpha}) U_{\alpha}^2\right) \cdot \exp\left[-\frac{m_{\alpha}}{2\theta_{\alpha z}} \left(\frac{2e_{\alpha}\phi(z)}{m_{\alpha}} + \frac{\alpha_{\alpha} e_{\alpha}^2 A_y^2(z)}{m_{\alpha}^2} - \frac{2U_{\alpha}(1 + \alpha_{\alpha}) e_{\alpha} A_y(z)}{m_{\alpha}} \right)\right], \quad (\text{П2})$$

$$G_x(s, l, m_{\alpha}, \theta_{\alpha z}, k_{\perp}, \Omega_{\alpha}(z)) = \int_0^{\infty} \tilde{N}_s^x v_{\perp} \exp\left(-\frac{m_{\alpha} v_{\perp}^2}{2\theta_{\alpha z}}\right) J_{s+l}\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\Omega_{\alpha}(z)}\right) J_l\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\Omega_{\alpha}(z)}\right) v_{\perp}^2 dv_{\perp} \quad (\text{П3})$$

$$I_x(\beta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{v_x^2 \exp\left(-\frac{m_{\alpha} v_x^2}{2\theta_{\alpha z}}\right)}{(\omega - k_x v_x - l\Omega_{\alpha}(z))} v dx = \frac{\theta_{\alpha z}}{m_{\alpha} k_x} \left[\frac{\sqrt{2\pi}}{\beta} - i\pi\beta^2 \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) \right], \text{ если } \beta > 1 \quad (\text{П4})$$

Здесь

$$\beta = \frac{\omega - l\Omega_{\alpha}(z)}{|k_x| v_{T\alpha}} \text{ где } v_{T\alpha} - \text{тепловая скорость компоненты } \alpha.$$

СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОПАУЗЫ

Ляхов В.В., Нецадим В.М., Акасов С.Б.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Предложена методика исследования и выбрана функция распределения компонент плазмы, что позволило смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы и исследовать её поляризацию. Полученные профили плотности плазмы и электромагнитного поля необходимы для дальнейшего исследования устойчивости магнитопаузы.

Область применения результатов: физика магнитосферы, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, МАГНИТОПАУЗА, МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ

$\pi\theta$

Зерттеу әдісі ұсынылған және таңдалған плазманың құрамдас бөліктерін тарату функциясы, тікелей қарсы аймақтағы нүкте магнитосфера және оның поляризациясын зерттеуде тұрақты магнитопаузальқ үлгі жасауға рұқсат етеді. Алынған профилдік плазмалық тығыздық және электромагниттік өріс магнитопаузаның орнықтылығын одан ары зерттеу үшін қажет.

Нәтижелерді қолдану аумағы: магнитосфералық физика, жер-сәулелік физика.

Кілттік сөздер: СӘУЛЕЛІК ЖЕЛ, МАГНИТОПАУЗА, МАГНИТТІК ҚАЙТА ҚОСУ.

The methods of research is suggested, and selected distribution function of the plasma components is chosen, that allowed us to simulate the stationary magnetopause in the frontal point of the magnetosphere and investigate its polarization. The resulting density profiles of plasma and electromagnetic fields are necessary for further investigation the stability of the magnetopause.

The area of application of the results: the physics of the magnetosphere, solar-terrestrial physics.

Key words: SOLAR WIND, MAGNETOPAUSE, MAGNETIC RECONNECTION

Введение

Геомагнитные бури оказывают значительное влияние на различные аспекты жизнедеятельности человека. Первые исследования по теории геомагнитных бурь были проведены основоположниками современной геофизики Чепмэном и Ферраро еще в тридцатых годах прошлого столетия [1,2]. Новый импульс исследования в этой области получили после осознания того факта, что Земля, как и другие планеты, погружены в расширяющуюся корону Солнца, названную солнечным ветром. Теория солнечного ветра была создана Паркером [3]. При обтекании потоком плазмы солнечного ветра магнитного поля Земли образуется магнитосфера, а в узкой области между плазмой и магнитным полем образуется пограничный слой, названный применительно к магнитосфере – магнитопаузой. Именно в магнитопаузе протекают определяющие процессы солнечно-земного взаимодействия, такие как пересоединение магнитных силовых линий солнечного ветра и магнитного поля Земли. Эти пересоединившиеся магнитные силовые линии сносятся солнечным ветром на ночную сторону, формируя магнитосферу Земли. Магнитопауза играет важнейшую роль и в магнитосферных бурях, обеспечивая поступление частиц плазмы солнечного ветра вдоль пересоединившихся силовых линий магнитного поля внутрь околоземного пространства.

Создание теории пограничного слоя встречает однако большие трудности математического характера [4], связанные, в частности, с некорректностью граничных условий (эти условия необходимо ставить на бесконечности).

В ряду других проблем теории переходного слоя наиболее важной является исследование процесса поляризации магнитоактивной плазмы переходного слоя. Так, спутниковые измерения в районе магнитопаузы свидетельствуют о наличии в этой области космического пространства стационарной и переменной компонент электрического поля. Переменную компоненту связывают с вариациями геомагнитного поля, а постоянную компоненту пытаются интерпретировать на основе явления поляризации магнитоактивной плазмы. Однако на сегодняшний день нет теории поляризации неоднородной магнитоактивной плазмы. Для того чтобы понять механизм возникновения стационарных электрических полей, обнаруженных в эксперименте, исследователи прибегают или к элементарным физическим оценкам, или к так называемому “квазинейтральному приближению” в описании магнитоактивной плазмы [5-7], суть которого состоит в использовании математического метода сингулярных возмущений. Однако, пользоваться этим методом необходимо с крайней осторожностью, поскольку результаты имеют

очень приближенный характер даже в том случае, если исследователю удалось избежать расходящихся членов ряда.

В приближении квазинейтральности электрический потенциал не полагается а priori равным нулю, но находится из условия равенства плотностей электронов и ионов:

$$n_e(A_y(z)) \phi(z) = n_i(A_y(z)) \phi(z).$$

Из этого соотношения можно выразить электрический потенциал через магнитный

$$\phi(z) = \phi(A_y(z))$$

и решить затем оставшееся уравнение для магнитного потенциала. Однако, это условие – тоже ограничение, накладываемое на плазму. Условие квазинейтральности хорошо выполняется при низких температурах и малых скоростях макроскопических потоков плазмы и хуже при высоких температурах и скоростях. В строгом смысле электронейтральное приближение является нулевым приближением метода сингулярных возмущений. Малым параметром для тепловой плазмы является отношение температуры электронов или ионов к энергии покоя соответственно электрона или иона. Нахождение следующего, уточняющего, первого приближения технически невозможно. Так, нельзя сделать никакого вывода о возможности пространственного разделения точек отражения компонент плазмы, определяемых методом квазинейтральности в нулевом приближении.

В истории изучения структуры неоднородных конфигураций магнитоактивной плазмы предпринимались попытки исследования эффекта поляризации в полной мере, вне границ приближения квазинейтральности [8, 9]. Так, Шабанским В.П. [8] было показано, что с увеличением скорости налетающего на магнитную стенку потока плазмы усиливается поляризация плазмы пограничного слоя и электрическое поле поляризации в области отражения частиц растет. Sestero [9] удалось численно решить задачу о равновесии пограничного слоя только для условного отношения масс электронов и ионов в 1/3, в то время как для реальной водородной плазмы это отношение составляет 1/1836. Т.о., вопрос о поляризации пограничных слоев и влиянии электрического поля на их устойчивость остается открытым. Например, в одной из последних теоретических работ, посвященных проблеме поляризации магнитоактивной плазмы, по-прежнему используется квазинейтральное приближение [10]. В экспериментальной работе [11]

поднимается вопрос о необходимости выяснения природы медленно меняющихся электрических полей, наблюдаемых во время геомагнитных бурь.

Наше исследование эффекта поляризации резко неоднородных структур магнитоактивной плазмы основывается на последовательном решении кинетического уравнения. При таком подходе мы выходим за пределы приближения квазинейтральности и исследуем проблему поляризации во всей её полноте. Электромагнитные свойства среды моделируются тензором диэлектрической проницаемости. Методика вычисления тензора диэлектрической проницаемости развита ранее и опубликована в открытой печати [12].

1. Структура и основные наблюдаемые электромагнитные характеристики магнитопаузы

Магнитопаузой называется пограничный слой между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли (рисунок 1)

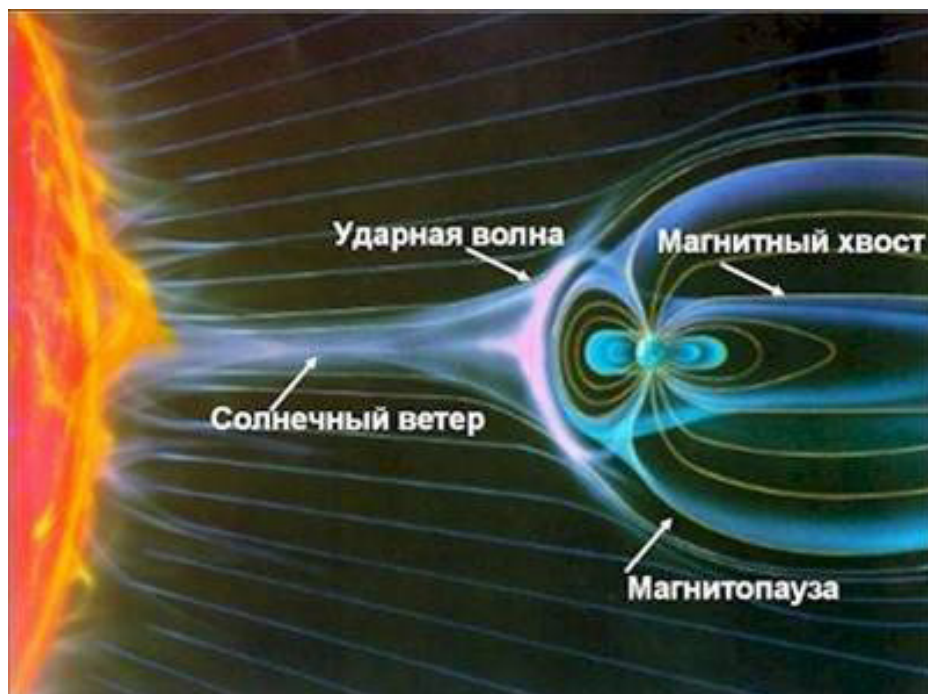


Рисунок 1 – Магнитосфера Земли

Теоретическому исследованию магнитопаузы в квазинейтральном приближении посвящены работы [13, 14]. Экспериментальное исследование границы магнитосферы в рамках программы «Cluster» освещается в работах [15-17]. В этих работах приведены частотные характеристики наблюдаемых электромагнитных полей. Так, компоненты постоянной составляющей электрического поля измеряются в диапазоне от 0.3 до 700 мВ/м, а компоненты переменной составляющей – в диапазоне от 1 до 104 мкВ/м. Обработаны данные наблюдений в период понижения и минимума солнечной активности с 2000 г. по 2008 г.

В первом приближении можно считать, что магнитопауза представляет собой пограничный слой между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли. Однако, в магнитосфере присутствует небольшое количество плазмы (значительно меньшее, чем в солнечном ветре), а в солнечном ветре имеется слабое межпланетное магнитное поле, обладающее в зависимости от цикла солнечной активности северной или южной компонентами. Напряженность ММП значительно меньше напряженности магнитосферного поля. Поэтому более адекватная модель магнитопаузы должна базироваться на теории контактного разрыва – пограничного слоя между двумя состояниями космической плазмы.

2. Постановка задачи

Будем считать, что контактный разрыв расположен в плоскости yoz (рисунок 2), слева и справа от разрыва расположена двухкомпонентная плазма с различным набором характеристик.

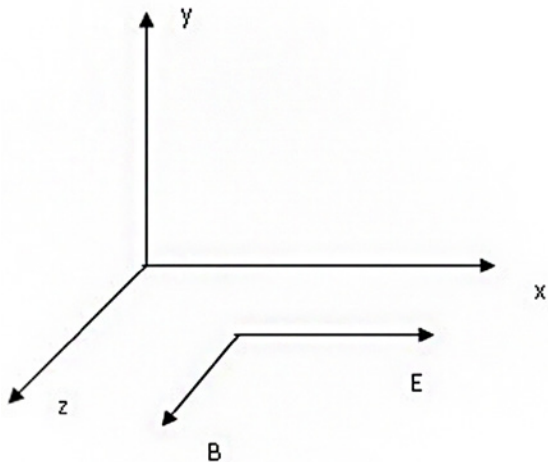


Рисунок 2 – Система координат, связанная с магнитопаузой в любой точке магнитосферы

Задача одномерна, все величины зависят от переменной x . Исследуемая среда описывается системой из кинетического уравнения

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + e_\alpha \left\{ \vec{E} + [\vec{v} \vec{B}] \right\} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{P}_\alpha} = 0 \quad (1)$$

и уравнений Максвелла с самосогласованным электромагнитным полем (внешние источники отсутствуют) внешние источники согласованным эле (1) уравнением

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \vec{j}, \text{div} \vec{B} = 0, \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\text{где } \rho = \sum_\alpha e_\alpha \int \delta f_\alpha d\vec{P}, \quad \vec{j} = \sum_\alpha e_\alpha \int \vec{v} \delta f_\alpha d\vec{P} \quad (3)$$

Задача (1),(2) решается методом теории возмущений

$$\begin{aligned} f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t) &= f_{0\alpha}(\vec{P}) + \check{a}f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t) \\ \vec{E}(\vec{r}, x, t) &= \vec{E}_0(x) + \check{a}\vec{E}(\vec{r}, x, t) \\ \vec{B}(\vec{r}, x, t) &= \vec{B}_0(x) + \check{a}\vec{B}(\vec{r}, x, t) \end{aligned} \quad (4)$$

Плазма считается слабонеравновесной $\check{a}f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t) < f_{0\alpha}(\vec{P})$. Равновесная функции распределения конструируется как функция от интегралов движения

$$\begin{aligned} f_{0\alpha}(\vec{P}) &= f_{0\alpha}(W_\alpha, P_{y\alpha}), \text{ где полная энергия и обобщенный импульс имеют вид:} \\ W_\alpha &= \frac{1}{2} m_\alpha (v_x^2 + v_y^2) + e_\alpha \phi(x) \\ P_{y\alpha} &= m_\alpha v_y + e_\alpha A_y(x) \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\phi(x)$ $A_y(x)$ - электрический и магнитный потенциалы

($\vec{E}_0 = -\text{grad}\phi, \vec{B}_0 = \text{rot}\vec{A}$). Для вычисления моментов функции распределения перейдем от плоскости координат (v_x, v_y) к плоскости координат (P_y, W) , являющихся интегралами движения (5). Каждая полуплоскость координат (v_x, v_y) , соответственно для $v_x < 0$ или $v_x > 0$ проектируется в одну и ту же область интегралов движения, определяемую неравенствами:

$$\frac{(P_y \mp eA_y)^2}{2m_{\pm}} \pm e\phi \leq W < +\infty, \quad (6)$$

$$-\infty < P_y < +\infty.$$

Якобианом перехода преобразований (5) является выражение $1/m_{\pm}^2 v_x$, поэтому интегрирование какой-либо функции $Q(v_x, v_y)$ выполняется следующим образом:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} Q(v_x, v_y) dv_x = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} dP_y \int_{W'}^{+\infty} \frac{Q[v_x(P_y, W), v_y(P_y, W)]}{m_{\pm} [2m_{\pm}(W \mp e\phi) - (P_y \mp eA_y)^2]^{\frac{1}{2}}} dW \quad (7)$$

где

$$W' = \pm e\phi + (P_y \mp eA_y)^2 / 2m_{\pm} \quad (8)$$

Отсюда, плотность заряда и плотность тока вычисляются по формулам:

$$q_{\pm}(x) = \pm e \int_{-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} dv_x f_{\pm}(x, v_x, v_y) = \pm 2 \frac{e}{m_{\pm}} \int_{-\infty}^{+\infty} dP_y \int_{W'}^{+\infty} \frac{f_{\pm}(P_y, W) dW}{[2m_{\pm}(W \mp e\phi) - (P_y \mp eA_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$j_{\pm}(x) = \pm e \int_{-\infty}^{+\infty} v_y dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} dv_x v_x f_{\pm}(x, v_x, v_y) = \pm 2 \frac{e}{m_{\pm}} \int_{-\infty}^{+\infty} dP_y \int_{W'}^{+\infty} \frac{P_y \mp eA_y}{2m_{\pm}} \frac{f_{\pm}(P_y, W) dW}{[2m_{\pm}(W \mp e\phi) - (P_y \mp eA_y)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Выбор функции распределения. Для описания равновесной структуры контактного разрыва необходимо выбрать равновесную функцию как функцию от интегралов движения. Эта функция должна быть физически уместной, хорошо моделирующей рассматриваемую ситуацию и в то же время достаточно простой с математической точки зрения. Воспользуемся методикой определения подобной функции распределения, изложенной в работе [18].

$$f_{0\alpha}(W_{\alpha}, P_{y\alpha}) = \frac{n_0 m_{\alpha}}{2\pi\theta} \exp\left(-\frac{W_{\alpha}}{\theta}\right), \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (-\infty, 0), \quad (11)$$

$$= C_{\alpha} \frac{n_0 m_{\alpha}}{2\pi\theta} \exp\left(-\frac{W_{\alpha}}{\theta}\right), \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (0, +\infty).$$

Такой выбор дает достаточно простую модель, описывающую контактный разрыв, т.е. переход плазмы от одного максвелловского состояния к другому. Для простоты температура выбрана одинаковой для обеих компонент (электронов и ионов) и с обеих сторон разрыва.

Введем следующие безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \mu_{\pm} = \mu, \mu_{-} = 1, \mu = \sqrt{\frac{m_{-}}{m_{+}}}, \varepsilon_{\pm} = \frac{W_{\pm}}{\theta}, p_{\pm} = \pm \frac{P_{y\pm}}{\sqrt{2m_{\pm}\theta}}, \varphi = \frac{e\phi}{\theta}, a = \frac{eA_y}{\sqrt{2m_{-}\theta}}, \\ q_{\pm} = \frac{\rho_{\pm}}{en_0}, j_{\pm} = \frac{J_{\pm}}{en_0} \sqrt{\frac{m_{-}}{2\theta}}, \xi = ex \sqrt{\frac{\mu_0 n_0}{m_{-}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вычислим плотность заряда (9) и плотность тока (10) для равновесной функции распределения (11) в безразмерных величинах:

$$q_{\pm} = \pm \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dp_{\pm} s_{\pm}(p_{\pm}) \int_{\varepsilon'}^{\infty} d\varepsilon \exp(-\varepsilon) [\varepsilon \mp \varphi - (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]^{-\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

$$j_{\pm} = \frac{\mu_{\pm}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dp_{\pm} (p_{\pm} - \mu_{\pm} a) s_{\pm}(p_{\pm}) \int_{\varepsilon'}^{\infty} d\varepsilon \exp(-\varepsilon) [\varepsilon \mp \varphi - (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Здесь

$$\begin{aligned} s_{\pm}(p_{\pm}) = 1 \quad \text{в области } -\infty < p_{\pm} < 0, \\ = C_{\pm} \quad \text{в области } 0 < p_{\pm} < +\infty, \end{aligned} \quad (15)$$

безразмерная форма соотношения (8) имеет вид:

$$\varepsilon' = \pm \varphi + (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2 \quad (16)$$

Можно провести интегрирование по полной энергии:

$$\begin{aligned} q_{\pm} = \pm \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\varepsilon) \int_{-\infty}^{\infty} dp_{\pm} s_{\pm}(p_{\pm}) \exp[-(p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2] \\ j_{\pm} = \frac{\mu_{\pm}}{\sqrt{\pi}} \exp(-\varepsilon) \int_{-\infty}^{\infty} dp_{\pm} (p_{\pm} - \mu_{\pm} a) s_{\pm}(p_{\pm}) \exp[-(p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2] \end{aligned}$$

Окончательное интегрирование по обобщенному импульсу приводит к выражениям для плотности заряда и плотности тока:

$$\begin{aligned} q_{\pm} = \pm \exp(\mp \varphi) \cdot [1 - (1 - C_{\pm}) \operatorname{erf}(\mu_{\pm} a)], \\ j_{\pm} = -\frac{\mu_{\pm}}{2\sqrt{\pi}} \exp(\mp \varphi) \cdot (1 - C_{\pm}) \exp(-\mu_{\pm}^2 a^2) \end{aligned} \quad (17)$$

Интеграл ошибок определяется следующим образом:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2) dt \quad (18)$$

Уравнения для потенциалов самосогласованного электромагнитного поля (2) имеют вид:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} = -(j_+ + j_-)$$

$$\frac{\varepsilon_0 \mu_0 \theta}{m_-} \frac{d^2 \varphi}{d\xi^2} = -(q_+ + q_-)$$
(19)

Система уравнений (19) описывает равновесные магнитное и поляризационное электрическое поле в плазме магнитопаузы.

4 Характеристики равновесного состояния магнитопаузы

Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. Оказывается, что система уравнений (19) допускает решение типа токового слоя. Поставим для этой системы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \varphi(\xi=0) &= 0 \\ \varphi'(\xi=0) &= 0 \\ a(\xi=0) &= 0 \\ a'(\xi=0) &= 0 \end{aligned}$$
(20)

Численное решение задачи (19), (20) проведено в пакете MAPLE-14. На рисунках 3а, б представлены профиль магнитного потенциала и напряженности магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.

Магнитное поле одинаково по величине и противоположно по знаку с обеих сторон разрыва.

Профиль плотности компонент плазмы контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. На рисунках 4а,б представлены профили плотности заряда компонент плазмы контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. Решения получены при значениях параметров, характерных для магнитосферы:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.00055; \\ \varepsilon_0 &= 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}; \\ \mu_0 &= 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}; \\ m_- &= 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; \\ \theta &= 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж, е} \end{aligned}$$
(21)

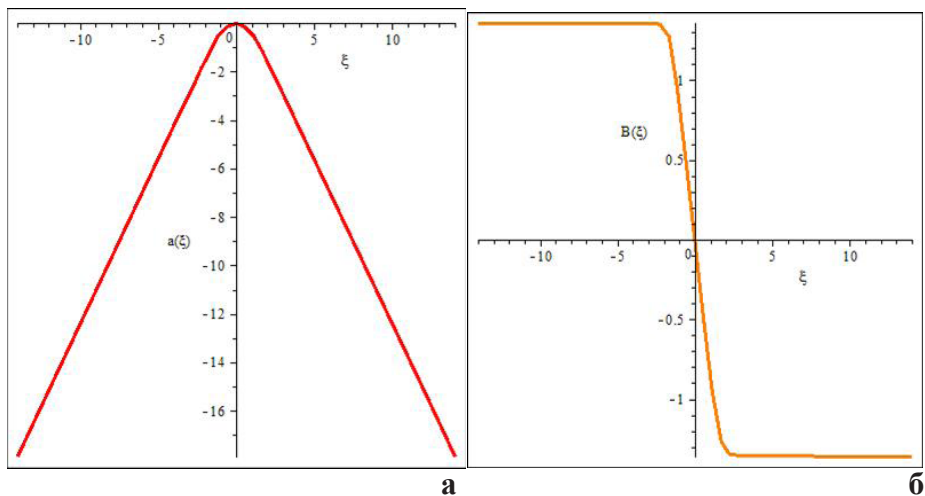


Рисунок 3 – Профиль магнитного потенциала для разрыва с симметричным магнитным полем (а) и профиль индукции магнитного поля для разрыва с симметричным полем (б)

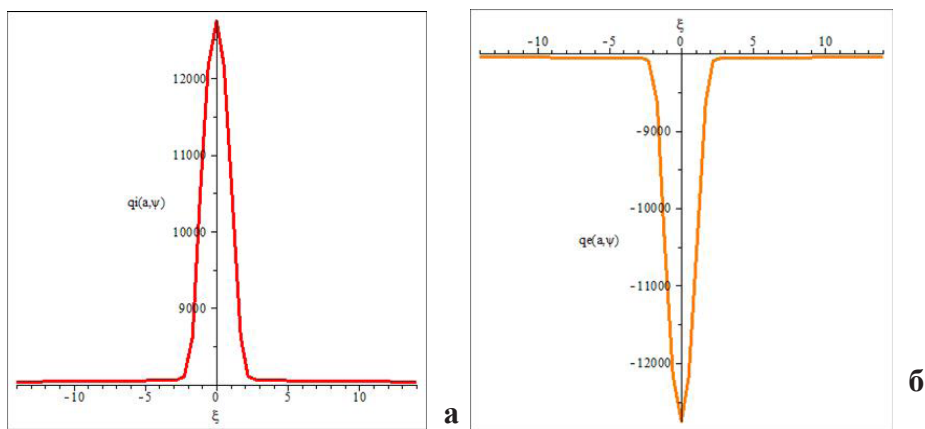


Рисунок 4 – Профиль плотности заряда ионов (а) и электронов (б) для разрыва с симметричным магнитным полем

Следует отметить, что разрывы подобного типа наблюдались на границе магнитосферы рядом авторов. Таким образом, введенная равновесная функция распределения (б) позволяет моделировать контактный разрыв для двух сред с симметричным магнитным полем.

Модель контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. Северо-южная компонента межпланетного магнитного поля периодически меняет свой знак с положительного на отрицательный. Рассмотрим вначале

случай с положительным направлением ($B_z > 0$). В этом случае направление северо-южной компоненты ММП совпадает с направлением земного магнитного поля на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контакт-ным разрывом со скачком магнитного поля одинакового направления. Уравнения, описывающие равновесную структуру магнитопаузы (19), решаем в приближе-нии метода квазинейтральности. Т.е., решение ищется методом разложения в ряд по малому параметру $\frac{\varepsilon_0 \mu_0 \theta}{m_-}$.

При этом второе уравнение системы (19) превращается в алгебраическое

$$q_+ + q_- = 0, \quad (22)$$

что позволяет выразить электрический потенциал через магнитный:

$$\varphi(a) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{g_+(a)}{g_-(a)} \right] \quad (23)$$

Здесь

$$g_+(a) = 1 - (1 - C_+) \operatorname{erf}(\mu a) \quad (24)$$

$$g_-(a) = 1 - (1 - C_-) \operatorname{erf}(a) \quad (25)$$

Условие (22) позволяет вычислить плотность компонент плазмы:

$$n(a) = [g_+(a) \cdot g_-(a)]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Подставив выражение для электрического потенциала (23) в первое уравнение системы (19), получим уравнение для магнитного потенциала:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} = \frac{1 - C_-}{2\sqrt{\pi}} \left[\frac{g_+(a)}{g_-(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-a^2) + \mu \frac{1 - C_+}{2\sqrt{\pi}} \left[\frac{g_-(a)}{g_+(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-\mu^2 a^2) \quad (27)$$

Первое интегрирование последнего уравнения позволяет получить выражение для магнитного поля:

$$B(a) = \frac{da}{d\xi} = [B_0^2 + (1 - C_-)I_-(a) + (1 - C_+)I_+(a)]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

где

$$I_-(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^a \left[\frac{g_+(t)}{g_-(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-t^2) dt \quad (29)$$

Проинтегрировав уравнение (28) еще раз, получим связь между пространственной координатой и магнитным потенциалом:

$$\xi = \int_{a_0}^a \pm [B_0^2 + (1 - C_-)I_-(a) + (1 - C_+)I_+(a)]^{\frac{1}{2}} da \quad (30)$$

$$I_+(a) = \frac{\mu}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^a \left[\frac{g_-(t)}{g_+(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-\mu^2 t^2) dt \quad (31)$$

Здесь константа B_0 – это значение индукции магнитного поля при $\xi = \infty$. То., получено решение исходной системы (19), позволяющее моделировать контактный разрыв для двух сред со скачком магнитного поля.

Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. Выражение (28) позволяет найти зависимость магнитного поля от магнитного потенциала, а затем по формуле (31) можно найти зависимость магнитного поля от пространственной координаты $B(\xi)$. Эта процедура была выполнена численно в пакете MAPLE-14, на рисунках 5а,б представлена зависимость равновесного магнитного поля от магнитного потенциала и пространственной координаты.

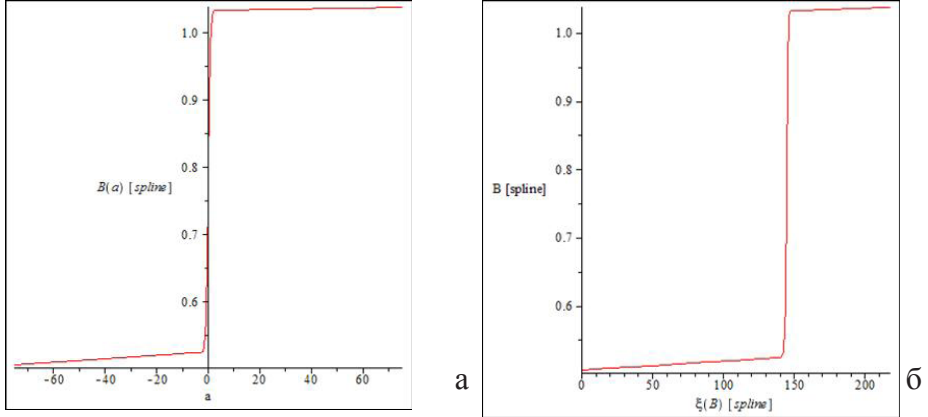


Рисунок 5 – Зависимость индукции магнитного поля от магнитного потенциала (а) и профиль индукции магнитного поля (б) для разрыва со скачком магнитного поля

Расчеты проведены для тех же значений магнитосферных параметров (21). В качестве граничных условий для уравнения (28) использованы значения:

$$B_0(a_0 = -75) = 0.5 \quad (32)$$

Константы модели приняты равными:

$$C_+ = C_- = 0.25 \quad (33)$$

Полученное решение может моделировать структуру магнитопаузы в ситуации, когда направление северо-южной компоненты ММП совпадает с направлением земного магнитного поля на низких широтах.

Профиль плотности компонент плазмы контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. Зависимость плотности компонент плазмы от магнитного потенциала рассчитывается по формуле (26), а затем, используя формулу (31) можно найти зависимость плотности компонент плазмы от пространственной координаты. На рисунках 6а,б представлена зависимость плотности компонент плазмы равновесной магнитопаузы от магнитного потенциала и пространственной координаты.

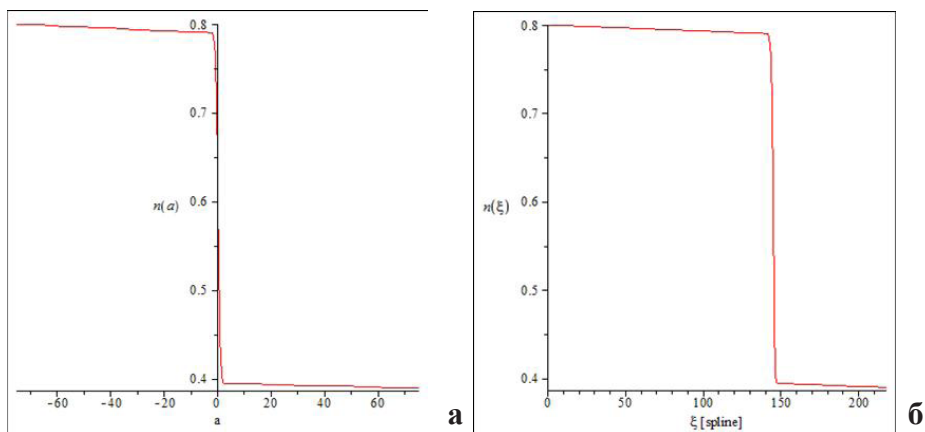


Рисунок 6 – Зависимость плотности плазмы от магнитного потенциала (а) и профиль плотности плазмы (б) для разрыва со скачком магнитного поля

Расчеты проведены в пакете MAPLE-14 для значений магнитосферных параметров (21), граничных условиях (32) и значениях свободных параметров (33). Из графика на рисунке 5б видно, что в магнитопаузе магнитное поле меняется от малого значения в области солнечного ветра до большого значения в области магнитосферы. Известно, что плотность плазмы солнечного ветра на орбите Земли составляет примерно 5 ч/см^3 . График рисунка 6б свидетельствует, что плотность плазмы при этом падает в области магнитосферы приблизительно на порядок, что соответствует экспериментальным данным. При этом сумма динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля по толщине стационарной магнитопаузы остается постоянным.

Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения (11) позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой

точки магнитосферы. Для случая симметричного магнитного поля магнитопауза моделируется как токовый слой с симметричным магнитным полем. Для случая, когда северо-южная компонента ММП сонаправлена земному магнитному полю, магнитопауза моделируется как контактный разрыв со скачком магнитного поля.

Модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Рассмотрим теперь случай с отрицательным направлением компоненты $B_z < 0$. Направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено по отношению к земному магнитному полю на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом со скачком магнитных полей противоположных направлений. Основой моделирования являются уравнения (19), решаемые в приближении метода квазинейтральности.

Магнитное поле слева от контактного разрыва (в области магнитосферы) рассчитывается по формуле (28), а справа от разрыва (в области солнечного ветра), где оно является отрицательным, по формуле:

$$B(a) = \frac{da}{d\xi} = -[B_0^2 + (1 - C_-)I_-(a) + (1 - C_+)I_+(a)]^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

В качестве параметров задавались те же значения (21), характерные для магнитосферы. Моделирование основано на сшивании двух решений (с двумя наборами свободных параметров модели): левой части одного решения и правой части другого. Расчеты проведены для двух наборов свободных параметров:

$$1) C_+ = C_- = 4,0, \quad B_0(a_0 = -5500) = 1,5, \quad (35)$$

$$2) C_+ = C_- = 0,9, \quad B_0(a_0 = -5500) = 0,0. \quad (36)$$

Точка сшивания ξ^* определяется как точка в структуре контактного разрыва, где индукция магнитного поля в обоих решениях достигает нуля $B(\xi^*) = 0$. Все рассчитанные функции сшивались в этой точке ξ^* . При этом формула для расчета плотности компонент плазмы (26) уточняется на некоторый коэффициент K :

$$n(a) = K[g_+(a) \cdot g_-(a)]^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

Этот коэффициент K определяется из условия баланса давлений:

$$\frac{\varepsilon_0 E^2(\xi)}{2} + \frac{B^2(\xi)}{2\mu_0} + [n_i(\xi) + n_e(\xi)]\theta = const \quad (38)$$

и при параметрах (35), (36) имеет значение $K = 2,22$.

Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Зависимость магнитного поля от магнитного потенциала рассчитана по формулам (34), (35), (36), а затем по формуле (31) найдена зависимость магнитного поля от пространственной координаты $B(\xi)$. Эта процедура была выполнена численно в пакете MAPLE-14, на рисунках 7а,б представлена зависимость равновесного магнитного поля от магнитного потенциала и пространственной координаты.

Полученное решение может моделировать структуру магнитопаузы в ситуации, когда направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено земному магнитному полю на низких широтах.

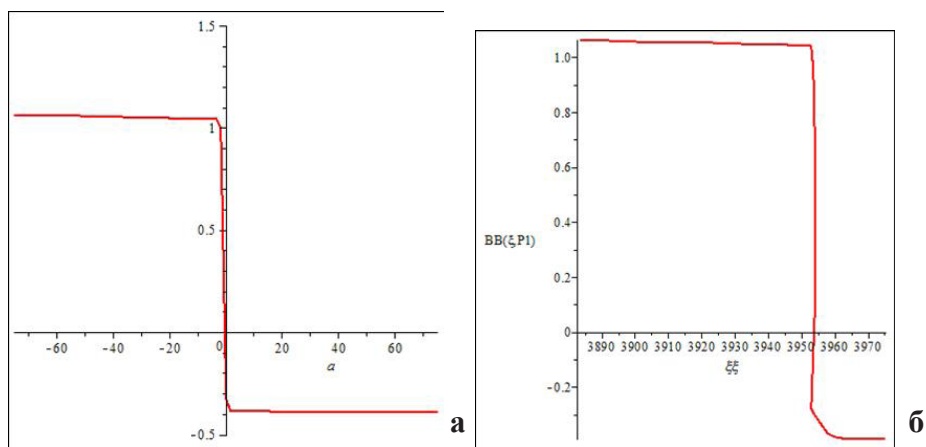


Рисунок 7 – Зависимость индукции магнитного поля от магнитного потенциала (а) и профиль индукции магнитного поля (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

Профиль плотности компонент плазмы и электрического потенциала контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Зависимость плотности компонент плазмы от магнитного потенциала рассчитывается по формуле (37), а затем, используя формулу (31) можно найти зависимость плотности компонент плазмы от пространственной координаты. На рисунках 8 а,б представлена зависимость плотности компонент плазмы равновесной магнитопаузы от магнитного потенциала и пространственной координаты.

Из рисунков 7б и 8б видно, что слева (в области магнитосферы) магнитное поле велико, а плотность плазмы мала по сравнению с их значениями справа (в области солнечного ветра). При этом всюду по толщине переходного слоя сумма

динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля остается величиной постоянной, т.е. выполняется соотношение (38). Созданная модель позволяет рассчитать электрический потенциал. На рисунке 9а представлен профиль электрического потенциала в зависимости от магнитного потенциала, рассчитанный по формуле (23). Используя связь магнитного потенциала с расстоянием (31), можно найти зависимость электрического потенциала от толщины контактного разрыва, см. рисунок 9б.

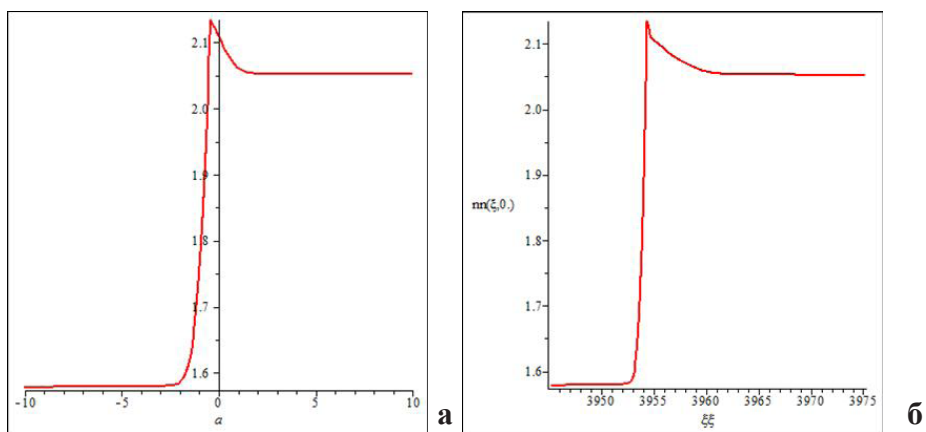


Рисунок 8 – Зависимость плотности плазмы от магнитного потенциала (а) и профиль плотности плазмы (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

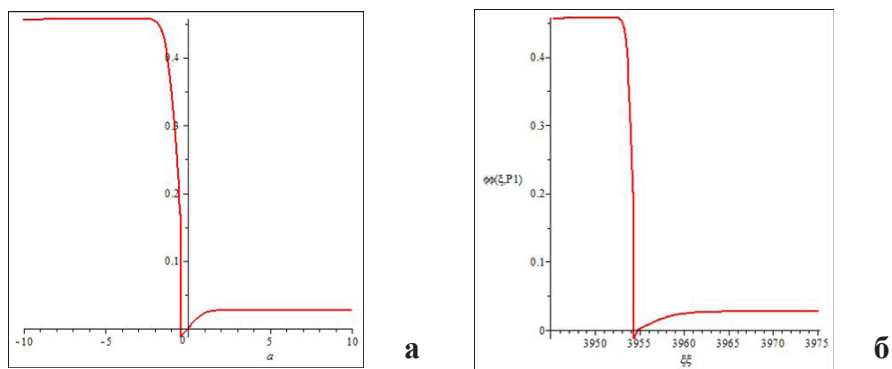


Рисунок 9 – Зависимость электрического потенциала от магнитного потенциала (а) и профиль электрического потенциала (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

На основе выбранной функции распределения создана модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Рассмотрена ситуация с отрицательным направлением компоненты ММП $B_z < 0$. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Уравнения, описывающие равновесную структуру магнитопаузы, решены в приближении квазинейтральности. Расчеты проведены в пакете MAPLE-14 при значениях параметров, характерных для магнитосферы. Изучены характеристики равновесного состояния магнитопаузы. Получен профиль магнитного поля исследуемого контактного разрыва. Магнитное поле в магнитопаузе меняется от малого отрицательного значения в области солнечного ветра до большой положительной величины в области магнитосферы. Исследованы пространственные характеристики плотности компонент плазмы и электрического потенциала равновесной магнитопаузы. Вычислены профили плотности компонент плазмы и электрического потенциала изучаемого контактного разрыва. Вдали от магнитопаузы (глубоко в области солнечного ветра или в области магнитосферы) профиль электрического потенциала представляет собой константу, так что все изменение потенциала приходится на окрестность контактного разрыва. Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы в случае антинаправленных магнитных полей (межпланетного и земного) разной напряженности.

5. Свойства поляризационного электрического поля равновесной магнитопаузы

Исследование поляризационного электрического поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. Численное решение задачи (19), (20) позволяет рассчитать электрический потенциал и напряженность самосогласованного электрического поля.

Решение проведено в пакете MAPLE-14. На рис. 10 а, б представлены профиль электрического потенциала и напряженности электрического поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.

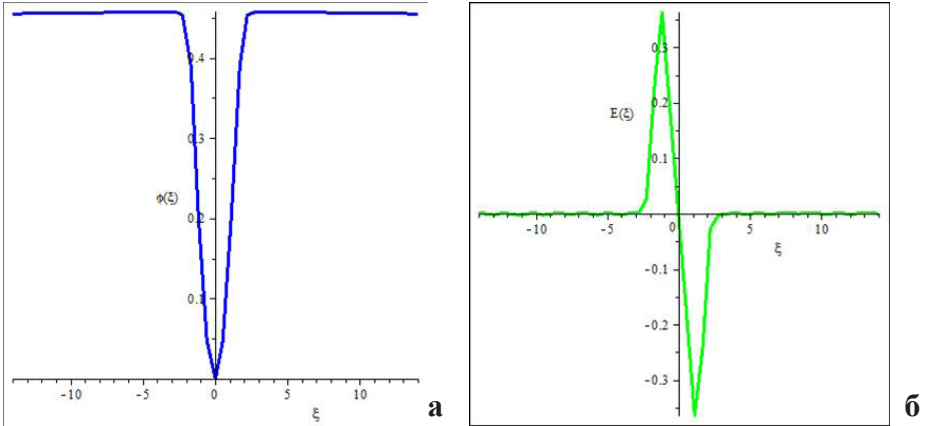


Рисунок 10 – Профиль электрического потенциала (а) и профиль напряженности электрического поля (б) для разрыва с симметричным магнитным полем

Видно, что электрическое поле соответствует двойному слою и сосредоточено внутри контактного разрыва.

Исследование поляризационного электрического поля контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. На рисунке 11а представлена зависимость электрического потенциала от толщины контактного разрыва. Расчеты по формулам (23) и (31) проведены в пакете MAPLE-14. Профиль напряженности электрического поля, представленный на рисунке 11б, получен методом численного дифференцирования функции электрического потенциала

$$E(\xi) = -d\phi(\xi)/d\xi \quad (39)$$

Как видно, поляризационное электрическое поле сосредоточено в узкой области контактного разрыва.

Исследование поляризационного электрического поля контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. На рисунке 12 представлена зависимость напряженности электрического поля от толщины контактного разрыва. Расчеты по формулам (23), (31) и (39) проведены в пакете MAPLE-14.

Видно, что электрическое поле медленно меняется слева от разрыва (в области магнитосферы), оставаясь отрицательным с плавным экстремумом. В самом контактном разрыве электрическое поле резко меняется на положительное, достигая большого значения в максимуме. Справа от разрыва (в области

солнечного ветра) электрическое поле опять становится отрицательным. Расчеты электрических полей для контактных разрывов разных типов выполнены для тех же параметров (21), характерных для магнитосферы.

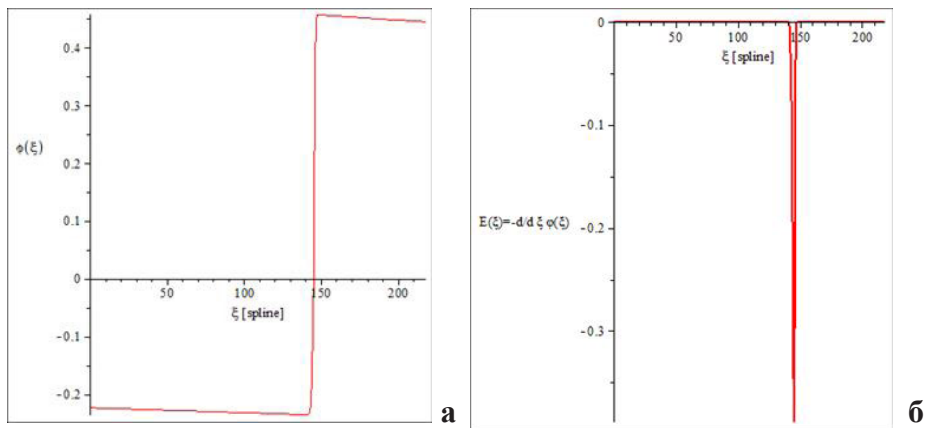


Рисунок 11 – Профиль электрического потенциала (а) и профиль напряженности электрического поля (б) для разрыва со скачком магнитного поля

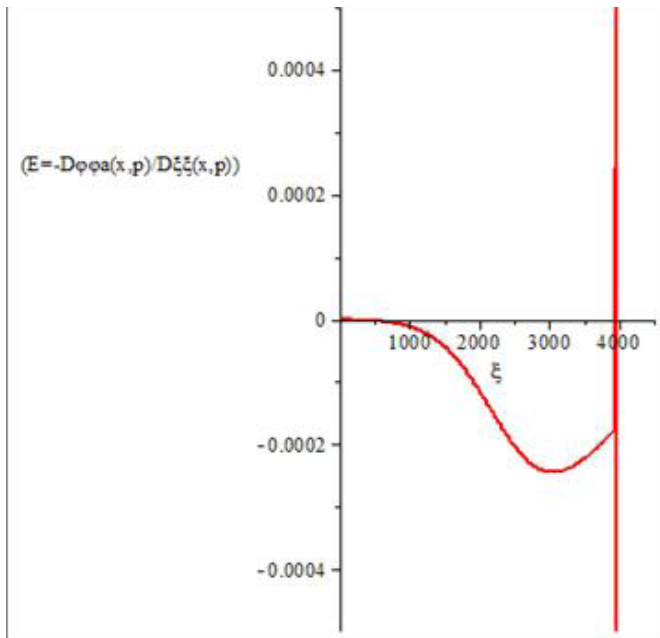


Рисунок 12 – Профиль напряженности электрического поля для разрыва с антинаправленными магнитными полями

Заключение

Подсолнечная область магнитопаузы моделируется плоским контактным разрывом. Исследуемая среда описывается системой из кинетического уравнения с самосогласованным электромагнитным полем (уравнение Власова). Для описания равновесной структуры контактного разрыва выбрана равновесная функция распределения, являющаяся функцией интегралов движения и представляющая собой модификацию распределения Максвелла. С помощью этой функции распределения вычислена плотность частиц и плотность тока и получены стационарные уравнения для электромагнитных потенциалов. Эти уравнения представляют собой систему автономных дифференциальных уравнений. Численное решение задачи при значениях параметров, характерных для магнитосферы проведено в пакете MAPLE-14, получен профиль напряженности магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. Представлены пространственные характеристики плотности компонент плазмы исследуемого контактного разрыва.

Рассчитаны профили магнитного поля и плотности плазмы стационарного контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. Магнитное поле в магнитопаузе меняется от малого значения в области солнечного ветра до большого значения в области магнитосферы. Полученное решение свидетельствует, что плотность плазмы при этом падает в области магнитосферы приблизительно на порядок, что соответствует экспериментальным данным. При этом сумма динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля по толщине стационарной магнитопаузы остается постоянным.

Создана модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Рассмотрена ситуация с отрицательным направлением компоненты межпланетного магнитного поля $B_z < 0$. В этом случае направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено земному магнитному полю на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.

Исследована поляризация стационарной магнитопаузы в окрестности подсолнечной точки для случаев с 1) антинаправленными симметричными магнитными полями 2) скачком магнитного поля одного направления и 3) антинаправленными магнитными полями разной напряженности.

Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения

позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы и исследовать её поляризацию. Полученные профили плотности плазмы и электромагнитного поля необходимы для дальнейшего исследования устойчивости магнитопаузы.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Изучить структуру и динамику магнитопаузы – пограничного слоя между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли».

Литература

1. *Chapman S., Ferraro V.C.A.* A new theory of magnetic storms: Part I – The initial phase. // Terr. Magn. Atmos. Elect. –1931. –V. 36, № 1. –P. 77-97.
2. *Chapman S., Ferraro V.C.A.* A new theory of magnetic storms: Part II – The main phase. // Terr. Magn. Atmos. Elect. –1933. –V. 38, N 1. –P. 79-96.
3. *Паркер Е.* Динамические процессы в межпланетной среде. // М., Мир.–1965. –362 с.
4. *Grad H.* Boundary layer between a plasma and magnetic field. // Phys. Fluids. –1961. –V. 4, №11. –P. 1366-1375.
5. *Schindler K., Birn J.* Models of two-dimensional embedded thin current sheets from Vlasov theory. // J. Geophys. Res. –2002. –V.107, № A8. 1193, doi: 10.1029/2001JA000304.
6. *Silin I., Buchner J., Zelenyi L.* Instabilities of collisionless current sheets: Theory and simulations. // Physics of Plasmas. –2002. –V. 9, № 4. –P. 1104-1112.
7. *Yoon P.H., Lui A.T.Y.* Model of ion- or electron-dominated current sheet. // J. Geophys. Res. doi:10.1029/2004JA010555. –2004. –V.109. –P. A11213.
8. *Шабанский В. П.* Структура переходного слоя между плазмой и магнитным полем. // ЖЭТФ. –1961. –Т. 40, № 4. –С. 1058-1064.
9. *Sestero A.* Charge separation effect in the Ferraro-Rosenbluth cold plasma sheath model. // Phys. Fluids. –1965. –V. 8, № 4. –P. 739-744.
10. *Harrison.M.G., Neukirch T.* Some remarks on one-dimensional force-free Vlasov-Maxwell equilibria. // Phys. Plasm. –2009. –V.16. –P. 022106-1 – 022106-9.
11. *Лазутин Л.Л., Гоцелок Ю.В., Муравьева Е.А. и др.* Динамика солнечных протонов в магнитосфере Земли во время магнитных бурь в ноябре 2004-январе 2005 // Геомагнетизм и аэронавигация. –2010. –Т. 50, № 2. –С.176-188.
12. *Lyahov V.V., Neshchadim V.M.* Kinetic theory of the current sheath. II. Effect of polarization on the stability of a current sheath // Advances in Space Research, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.006>
13. *Alpers W.* Steady state charge neutral models of the magnetopause // Astroph. Space Sci. –1969. –V.5. –P. 425-437.
14. *Alpers W.* On the equilibrium of an exact charge neutral magnetopause // Astroph. Space Sci. –1971. –V.11. –P. 471-474.
15. *Amata E. et all.* Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow

with charged thin current sheets: 1. Boundary structure and motion//www.nonlin-processes-geophys.net/13/365/2006/.

16. *Savin S. et al.* Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer//www.nonlin-processes-geophys.net/13/377/2006/.

17. *Taktakisvili A. et al.* Ion escape from the high latitude magnetopause: analysis of oxygen and proton dynamics in the presence of magnetic turbulence//*Ann. Geophys.* –2007.–V. 25. –P. 1877-1885.

18. *Sestero A.* Structure of Plasma Sheaths // *Phys. Fluids.*–1964.– V. 7, N1.–P. 44-51.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Ашкалиев Я.Ф., Мукашева С.Н., Нургалиева К.Е., Нуракинов С.М.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В работе показано использование современных спутниковых технологий для мониторинга верхних слоев земной атмосферы.

Область применения результатов: физика ионосферы, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: ИОНОСФЕРА, ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Жұмыста жер атмосферасының жоғарғы қабаттары мониторингі үшін заманауи серіктік технологиялардың қолданылуы көрсетілген.

Нәтижелердің қолданылу аймақтары: ионосфера физикасы, күн-жер физикасы.

Басты сөздер: ИОНОСФЕРА, ТОЛЫҚ ЭЛЕКТРОНДЫҚ МАЗМҰН

The paper presents the results of using of modern space technologies for monitoring of upper atmosphere layers.

The area of application of the results: physics of the ionosphere, solar-terrestrial physics.

Keywords: IONOSPHERE, TOTAL ELECTRON CONTENT

С наступлением космической эры появилась возможность непосредственного измерения параметров околоземной космической плазмы с помощью аппаратуры, установленной на борту космических аппаратов.

Запуски искусственных спутников Земли, ИСЗ, предназначенных специально для изучения ионосферы, позволили получить богатую информацию о состоянии и поведении земной ионосферы. Прямые измерения параметров ионосферы, импульсное радиочастотное зондирование ионосферных слоев с помощью пролетных ИСЗ «Интеркосмос-19», система ИСЗ «Транзит», ИСЗ «ИонозондЭ», ИСЗ «Синком 3», с геостационарных ИСЗ «ATS-1», «ATS-3», «ATS-6», «SIRIO», «ETS-II», в которых участвовали и казахстанские ученые, дали очень много сведений о свойствах ионосферной плазмы, ее пространственном распределении, о разнообразных электромагнитных и динамических процессах, которые в ней протекают.

Использование современных спутниковых технологий для исследования верхних слоев земной атмосферы дало уникальную возможность не только расширить диапазон высот наблюдения ионосферы, но и расширить круг решаемых задач в плане изучения физики ионосферы.

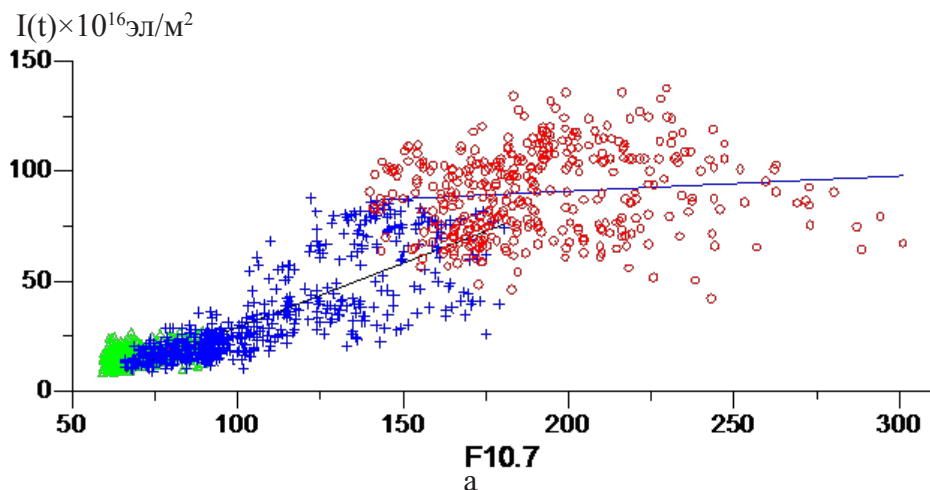
Просвечивание ионосферы высокочастотными радиосигналами позволяет получить информацию о полном электронном содержании, ПЭС, $I(t)$ в столбе единичного сечения между передатчиком на ИСЗ и приемником, расположенным на Земле (TECU – общепринятая единица полного электронного содержания TECU (total electron content unit), равная 10^{16} эл/м²). Радиопросвечивание позволяет выявить характерные особенности ионосферы для данного региона и является одним из самых надежных средств контроля ионосферы во время возмущений. Так, в ходе непрерывного транзионосферного зондирования околоземной плазмы с использованием сигналов геостационарных ИСЗ «SIRIO» и «ETS-II» при разных уровнях солнечной активности и сопоставлении результатов спутникового эксперимента с данными вертикального зондирования ионосферы (критических частот слоя F2, foF2) было показано, что вариации полного электронного содержания $I(t)$, так и критических частот слоя F2, foF2, “отслеживают” изменение солнечной активности. Отмечается увеличение в 5-6 раз дневных значений (изменение ночных значений примерно в 8 раз) интегрального электронного содержания ионосферы в годы максимума солнечной активности по сравнению с годами минимума солнечной активности, при этом отношения критических частот слоя-F2 в условиях максимума солнечной активности к foF2 в минимуме изменяются в пределах

(1,7÷2,0) для полудня и (1,3÷1,8) для полуночи.

Характер взаимной зависимости ПЭС $I(t)$ и суточными значениями потока радиоизлучения Солнца, $F10.7$, показан на рисунке 1, где представлена линейная регрессионная зависимость между полуночными и полуденными $I(t)$ и $F10.7$ (а, б). Обращает на себя внимание тот факт, что электронное содержание является независимым от солнечной активности в пределах значений $F10.7$ до, примерно, 80 единиц, при $80 < F10.7 < (150 \div 200)$ наблюдается положительная корреляция – $I(t)$ может быть представлено в виде линейных функций вида $y = b_1x + b_0$. Начиная со значений $F10.7 > (150 \div 200)$ единиц зависимость ПЭС от $F10.7$ опять ослабевает (с ростом значений $F10.7$ рост значений ПЭС, практически, прекращается).

Такое явление в ионосфере, когда связь с солнечной активностью аппроксимируется двумя или тремя линейными участками, замечено давно [1] и касалось зависимости критических частот слоя F2 от солнечной активности; что же касается интегрального электронного содержания, то, по крайней мере, для Казахстанского региона, такая информация отсутствовала до наших исследований [2].

Лучевая траектория геостационарный ИСЗ ETS-II и радиополигон «Орбита» [43.2°N; 76.9°E]



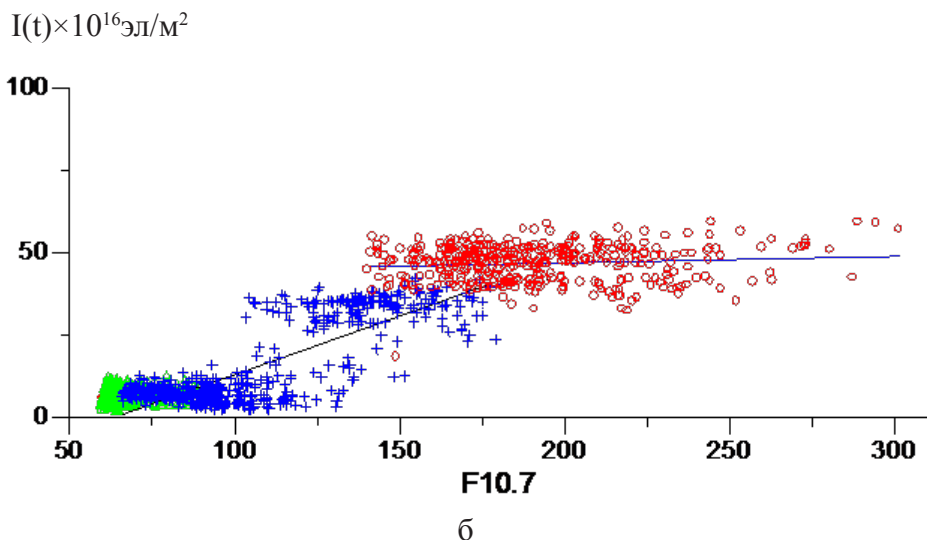
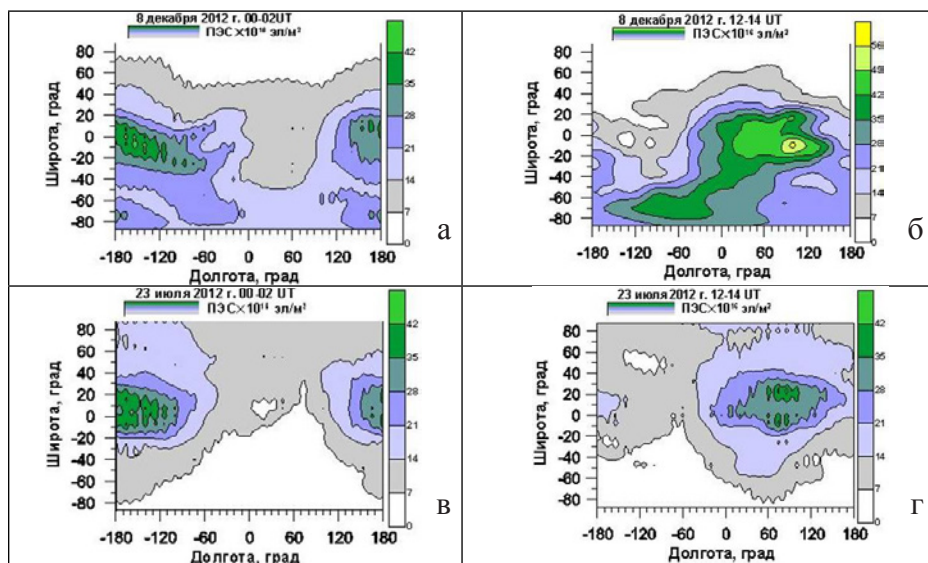


Рисунок 1 – Зависимость полного электронного содержания от уровня солнечной активности

Для решения указанных задач уже с конца 80-х гг. начали создаваться сети приемников GPS как общего назначения, так и специализированные. В настоящее время в мире действуют глобальная международная геодинимическая сеть приемников GPS (International GPS Service for Geodynamics, IGS), а также ряд региональных сетей. Увеличение плотности покрытия территорий наземными станциями GPS является общей тенденцией в мировой практике. Бурное развитие наземных сетей станций GPS наблюдается в США, Японии, Европе, Китае, Австралии, Корее, Латинской Америке [5]. В Казахстане, в Алматинском сейсмоопасном регионе функционирует локальная сеть непрерывных GPS-наблюдений, состоящая из 10 перманентных дифференциальных базовых станций, расположенных на Алматинском прогностическом полигоне Сейсмологической опытно-методической экспедиции ТОО «Институт сейсмологии» и ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ» [10]. Развертывание Казахстанской сети приемников GPS, предназначенной для непрерывного мониторинга движений земной коры, позволяет на этой же базе наладить службу непрерывного мониторинга ионосферы с целью выявления ионосферных предвестников землетрясений. Авторы ряда работ [3, 6-10] разработали основы и создали программный комплекс мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения на основе фазовых измерений вариаций полного электронного содержания, выполненных с

помощью геостационарных и системы навигационных искусственных спутников Земли. Современные спутниковые технологии позволяют изучить общее состояние земной ионосферы и ее состояние над выбранным регионом в рассматриваемый период.

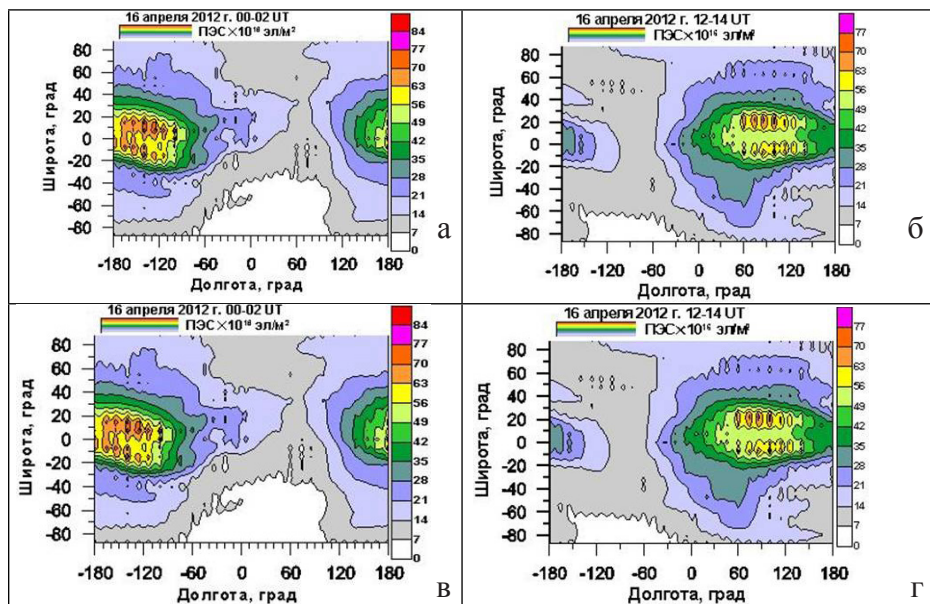
С применением технологии GIM (Global Ionospheric Maps) [10] построим глобальные карты полного электронного содержания для магнито-спокойных условий разных сезонов (зима, весна, лето, осень) 2012 г., содержащие 2-х часовые значения локального электронного содержания (в единицах TECU, соответствующие долготно-широтной сетке с разрешением 5° (436 км) по долготе и 2.5° (279 км) по широте). В работе используются GIM-карты, рассчитанные Швейцарским центром CODE (Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland) с использованием данных более 150 GPS приемных станций (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>). На рисунке 2 представлены карты глобального распределения полного электронного содержания для времени суток 00 UT-02 UT и 12 UT-14 UT для магнитоспокойного зимнего дня 8 декабря 2012 г. (2а и 2б, соответственно) и для магнитоспокойного летнего дня 23 июля 2012 г. (2в и 2г, соответственно).



а) 8 декабря 2012 г. 00-02 UT; б) 8 декабря 2012 г. 12-14 UT; в) 23 июля 2012 г. 00-02 UT; г) 23 июля 2012 г. 12-14 UT.

Рисунок 2 – Карты глобального распределения полного электронного содержания для зимних и летних условий

Распределение электронной концентрации в периоды весеннего и осеннего равноденствия показаны на рисунке 3.



а) 16 апреля 2012 г. 00-02 UT; б) 16 апреля 2012 г. 12-14 UT; в) 25 ноября 2012 г. 00-02 UT; г) 25 ноября 2012 г. 12-14 UT.

Рисунок 3 – Карты глобального распределения полного электронного содержания для равноденственных условий

Видно, что картина распределения во время весеннего равноденствия схожа с летним, однако значительно отличается по плотности концентрации – максимумы порядка $\approx (75-78) \times 10^{16}$ эл/м², что выше летнего максимума на ≈ 62 %, рисунок 2а и 2б. Распределения во время осеннего равноденствия схожи с зимним, однако значительно отличаются по плотности концентрации – максимумы порядка $\approx (81-84) \times 10^{16}$ эл/м², что выше зимнего максимума на ≈ 40 %, рисунок 3в и 3г.

На рисунке 4 приведены суточные вариации локальных значений (г. Алматы) полного электронного содержания для магнитоспокойных дней различных сезонов – 8 декабря 2012 г. (синяя кривая), 16 апреля 2012 г. (зеленая с треугольниками), 23 июля 2012 г. (красная с точками) и 25 ноября 2012 г. (оранжевая с крестиками).

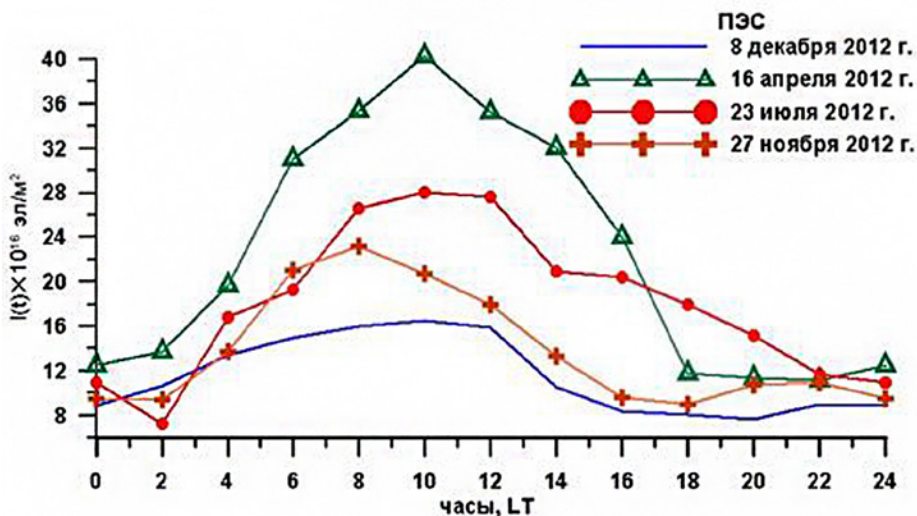


Рисунок 4 – Суточный ход абсолютных значений полного электронного содержания, рассчитанного по картам IONEX при спокойных геомагнитных условиях

В ночные часы, независимо от сезона, локальные значения электронной концентрации варьируются в пределах $\approx (8-12) \times 10^{16}$ эл/м², при этом, вариации весной (самые высокие) превышают зимние (самые низкие) на 50 %. В дневное время суток максимальные амплитуды вариаций приходятся на период весеннего равноденствия, когда локальные значения электронной концентрации поднимаются до $\approx (39-40) \times 10^{16}$ эл/м² в 10 UT, что в ≈ 2.5 раза превышает амплитуду вариаций в зимний период и в ≈ 1.8 и в ≈ 2.0 раза превышает амплитуду вариаций в весенний и летний периоды, соответственно. Ежедневные вариации ПЭС при спокойных геомагнитных условиях не превышают 10-12%.

В заключении, следует сказать, что при выявлении различных ионосферных возмущений необходимо учитывать общее состояние ионосферы, контролируемое коротковолновым излучением Солнца, также необходимо знать региональные, сезонные особенности.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Разработать методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. -М., -1972. -563 с.
2. *Мукашева С.Н.* Морфология поведения интегрального электронного содержания ионосферы над Казахстаном (по данным метода транссионосферного зондирования) [Текст]: диссертация канд. физ.-мат. наук: 01.03.03. РН 0499РК01150: защищена 24.12.99.–Алматы.–1999. 120с.
3. *Афраймович Э. Л., Первалова Н. П.* GPS –Мониторинг верхней атмосферы Земли// ЦОП БИБММ ИГУ и ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, Иркутск. –2006 –479 с.
4. *Первалова Н.П.* Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения// Солнечно-земная физика.–2011.– Вып. 19. –С. 124–133.
5. *Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leanovich L.A.* The use of the international GPS network as the global detector (GLOBDET) simultaneously observing sudden ionospheric disturbances//Eath, Planets, and Space.–2000a.–Vol. 52, № 11.–P.1077-1082.
6. *Bradley P.A., Dick M.I.* Use of ground-based and satellite data for an improved procedure for testing the accuracy of ionospheric maps. // Proceedings of Session G6 at the XXIV-th General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) Kyoto, Japan, August 25-September 2, 1993. // Published by World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics National Geophysical Data Center. - January 1995. - P. 134 - 143.
7. *Солодовников Г.К., Бакай А.С., Русскин В.М., Фаткулин М.Н.* Использование данных спутникового зондирования для исследования волновых движений и неоднородной структуры внешней ионосферы. // Геомагнетизм и аэрномия. -1981. -т. 21. - № 6. - с. 1009-1017.
8. *Davies K.* *Recent progress in satellite radio beacon studies.* // Space Science Reviews. -1980. -№ 25. -P. 357–430.
9. *Davies K., Degenhardt W., Hartmann G.K., Leitinger R.* Electron content measurements over the U.S.// Joint radio beacon program NOAA / MPAE / GRAZ. Station report ATS-6 94° W. Edited by MPI f. Aeronomie, November. -1977. - P. 183.
10. *Ашкалиев Я.Ф., Бибосинов А.Ж., Бреусов Н.Г., Жумабаев Б.Т., Курманов Б.К., Мукашева С.Н., Нурғалиева К.Е., Садықов К.А.* Подготовка данных глобальной навигационной спутниковой системы GPS для выявления сейсмоионосферных эффектов (методические указания) // Ғылым ордасы, Алматы, Казахстан.–2012.–43 с.

РАДИОАСТРОНОМИЯ В КАЗАХСТАНЕ СЕГОДНЯ

Гонтарев О.Г., Жумабаев Б.Т., Левин Ю.Н., Акасов С.М., Бобров М.Н.,
Николаевский Н.Ф., Водяников В.В.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В работе приводится краткое описание развития радиоастрономических наблюдений Солнца и аппаратуры обсерватории «Орбита» ДТОО «Института ионосферы» АО «НЦ КИТ». Рассматриваются некоторые результаты наблюдений в 24-ом цикле солнечной активности, как на фиксированных частотах, так и в диапазоне 45-870 МГц.

Область применения результатов: физика магнитосферы, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: РАДИОАСТРОНОМИЯ, ПОТОК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Жұмыста Күннің радиоастрономиялық бақылаулары дамудың және «ҰҒЗТО» АҚ «Ионосфера институты» ЕЖШС-ің «Орбита» обсерваториясы аппаратурасының қысқаша сипаттамасы келтіріледі. Күн белсенділіктің 24-ші айналымында, белгіленген жиіліктерде де, 45-870 МГц аралықта да бақылаулардың кейбір нәтижелері қаралады.

Нәтижелерді қолдану аумағы: күн физикасы, жер-сәулелік физика.

Кілттік сөздер: РАДИОАСТРОНОМИЯ, КҮННІҢ РАДИОСӘУЛІЕ ШАШУ АҒЫНЫ

The paper presents information on development of radio observations of the Sun in and measurement complex “Orbita” in the Institute of ionosphere. The results of monitoring in the 24 solar cycle both at fixed frequencies and at 45-870 mHz are considered.

The area of application of the results: Physics of Sun, Solar-Terrestrial physics.

Keywords: RADIOASTRONOMY, SUN’S RADIO FLUX

Введение

За годы существования как суверенное государство, Казахстан активно осваивает новые технологии, включая космические. Были реализованы задания Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы», запущены спутники связи «КазСат-1» и «КазСат-2», намечены планы по созданию собственной системы спутниковой навигации и другие проекты по развитию наукоемких космических технологий в республике.

Основную долю проектов, связанных с исследованием космического пространства курирует АО «Национальный центр космических исследований и технологий» (АО «НЦКИТ»). В состав этого центра входит и ДТОО «Институт ионосферы», который отмечает в этом году свое тридцатилетие. Этому событию и посвящается данная работа.

Немного истории. Радиоастрономия в Казахстане зарождалась в Секторе ионосферы при Президиуме АН КазССР еще в конце шестидесятых годов прошлого столетия. В качестве радиометра использовался измеритель антенных характеристик П5-9 и антенна от РЛС П-20 с поворотной кабиной дополненная механизмом электромеханического привода по углу места. Кабина располагалась на территории Сектора ионосферы на Каменском плато, Алматы (высота ≈ 1200 метров над уровнем моря). Наблюдения велись на волне 30 см (1 ГГц). Такое расположение высокочувствительной приемной аппаратуры было обречено на совершенно недопустимый уровень помех от РЛС аэропортов Алматы и Бурундая. Было решено перенести аппаратуру в район Корональной Станции Астрофизического института АН КазССР (Высокогорной астрономической станции ГАИШ АН СССР) на высоту 2700 м. Место было выбрано после промера уровня радиопомех в широком частотном диапазоне. Там, кроме всего была не задействованная параболическая антенна диаметром 2 м. установленная на астрономический штатив с часовым механизмом слежения за Солнцем. На этой антенне нами был установлен измеритель антенных характеристик П5-10 с переделанным модулятором и наблюдения велись на волне 3,2 см.

В 1970 году для изучения квазипериодических пульсаций солнечного радиоизлучения на антенне были установлены два смещенных от оси антенны облучателя и осуществлен один из способов квазиулучевого метода приема. На основе результатов пятилетних наблюдений была защищена кандидатская диссертация «Характерные особенности квазипериодических колебаний потока радиоизлучения Солнца на волне 3,2 см и солнечная активность» [1]. Результаты

наблюдений на этой установке были изложены в работах [2;3;4;5;6;8;9;10]. Весь этот период отличался крайне низким уровнем применяемой регистрирующей техники и автоматизации процесса наблюдений. Записи велись на аналоговые самописцы, данные снимались вручную, а затем вручную оцифровывались и вводились в ЭВМ для дальнейшей обработки. В дальнейшем Сектору ионосферы были выделены от АН КазССР финансы на приобретение антенной системы ТНА – 57. К 1980 году ОКБ МЭИ (разработчик данной антенной системы) выделил Сектору ионосферы антенную систему ТНА-57М.

На рисунке 1 приведено фото этой антенны. Было выбрано место установки антенны, построено сейсмоустойчивое несущее здание, на котором была смонтирована сама антенна. К этому времени совместно с НИРФИ (Нижний Новгород) был создан спектрограф на диапазон 2-4 ГГц с регистрацией уже в память ЭВМ [7]. В девяностые годы прошлого столетия, в период становления Казахстана как самостоятельного государства, наблюдения были прерваны и только в новом тысячелетии уже в Институте ионосферы были проведены работы по модернизации и реконструкции радиополигона «Орбита», где и располагается ТНА-57. Весь проект был разделен на два этапа. Все работы, сделанные за этот период, отражены в финальных отчетах [11; 12].

Аппаратура. Антенна ТНА-57М азимутально-угломестной монтировки с зеркалом диаметром 12 метров. Фокусное расстояние 3 метра. Опорно-поворотное устройство снабжено приводами с двигателями постоянного тока типа ДПМ. Для слежения за Солнцем используются тиристорные приводы по азимуту и углу места СУ-12М. Слежение за Солнцем осуществляется по программе, которая рассчитывается и вводится в компьютер ежедневно. На антенне установлен облучатель, который представляет собой логопериодическую антенну, рабочий диапазон которой от 500 МГц до 3 ГГц. Два радиометра модуляционного типа прямого усиления с центральными рабочими частотами 1,078 ГГц и 2,8 ГГц в термостатизированном контейнере установлены непосредственно за зеркалом антенны в технологическом пространстве угломестной оси. Реконструкция ТНА57 отображена в отчете [11].

Мониторинг потока радиоизлучения Солнца на частотах 1 и 3 ГГц.

Основные технические характеристики радиометров РМ-10 и РМ30

1. Центральные частоты: 1 и 2.8 ГГц.
2. Полоса пропускания - 11 % в диапазоне 2.8 ГГц и 1% в диапазоне 1 ГГц.

3. Входной импеданс тракта - 50 Ом.
4. Флуктуационный порог чувствительности - 0,5 К (3 ГГц) и 0,8 К (1 ГГц) при постоянной времени 1 сек.
5. Коэффициент усиления по СВЧ- тракту - около 50 дБ.
6. Коэффициент внеполосного затухания не хуже 30 дБ.
7. Нестабильность коэффициента усиления - менее 1%.
8. Общая термостабилизация: температура ВЧ-блока $38^{\circ}\pm 0^{\circ},3$.

Радиометры используются для патрульной службы (мониторинга) радиоизлучения Солнца как одного из параметров солнечной активности. Данные оцифровываются с пятисекундным интервалом, и после форматирования передаются в Институт в центр прогноза космической погоды. На сайте прогностического центра они являются достоянием всех желающих. Данные о первых всплесках радиоизлучения Солнца в новом 11-ти летнем цикле солнечной активности приведены в работе [15].

Спектральные измерения. В мае 2011 года обсерватория «Орбита» была укомплектована спектрографом на диапазон 45-870 МГц. Для этого в институте была создана логопериодическая антенна. Она была установлена на нижней кромке зеркала ТНА-57 (Рис.1) и соединена со спектрографом e-Callisto, который является стандартным в мировой сети получения информации о спектральных характеристиках спорадического радиоизлучения Солнца в диапазоне 45-870 МГц. Такая монтаж антенны спектрографа позволяет отслеживать траекторию Солнца используя систему привода ТНА-57. Данная международная сеть спектрографов обеспечивает наземные наблюдения Солнца 24 часа в сутки 7 дней в неделю. Подробную информацию о сети этих приборов можно подучить на сайте <http://e-callisto.org/>. В работе [16] дается сообщение о вводе в строй нового пункта с Callisto, описана помеховая обстановка в месте расположения антенны и приведен спектр первого зарегистрированного всплеска.

Данные о радиовсплесках очень важны как в фундаментальном плане для исследования физики Солнца, так и в прикладном аспекте для прогноза космической погоды. Всплески солнечного радиоизлучения второго типа являются одним из основных предвестников прихода к магнитосфере Земли выбросов корональной массы (СМЕs), вызывающих геомагнитные бури. По динамическим спектрам можно сразу определить тип всплеска и в совокупности с другими геоинформативными данными определить вероятность и время начала геомагнитной

бури. Все получаемые данные используются для прогнозирования космической погоды [12,13,14]. Кроме того, они представляют и самостоятельный интерес при изучении физики процессов, происходящих как на самом Солнце, так и в земной магнитосфере и ионосфере.



Рисунок 1 – Общий вид ТНА 57М с логопериодической антенной радиоспектрографа на нижнем срезе зеркала

Результаты наблюдений радиоизлучения Солнца. На рисунке 2 приведен пример записи потока радиоизлучения Солнца на частотах 1 и 2,8 ГГц за 9 Августа 2011 года, когда на Солнце произошло несколько вспышек балла С и выше.

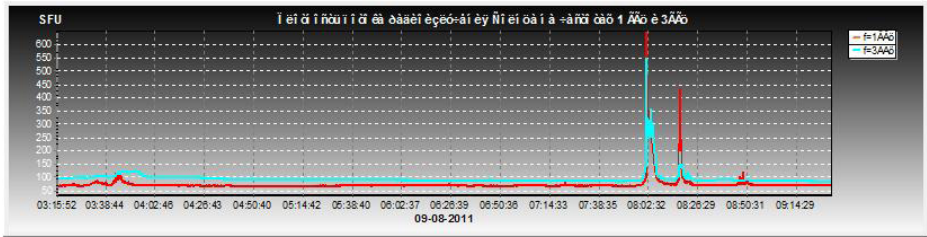


Рисунок 2 – Пример всплесков радиоизлучения Солнца 9 августа 2011 г.

Первый всплеск в 3:30 UT сопровождал вспышку M2.5 рентгеновского класса, второй мощный всплеск в 8:05 UT сопровождал вспышку X6.9 рентгеновского класса (рис.3).

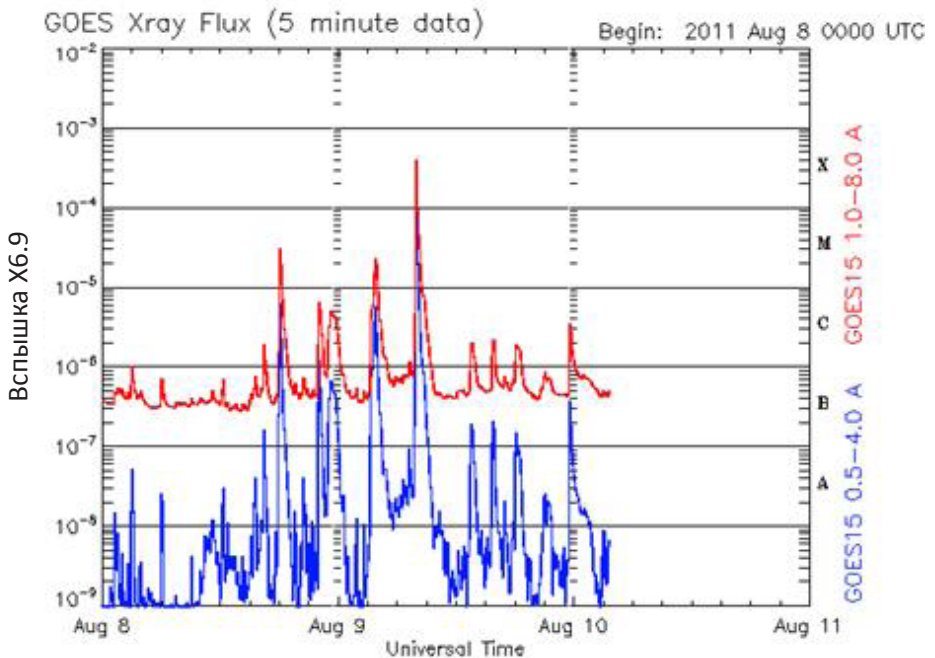
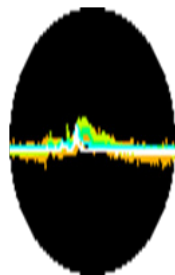
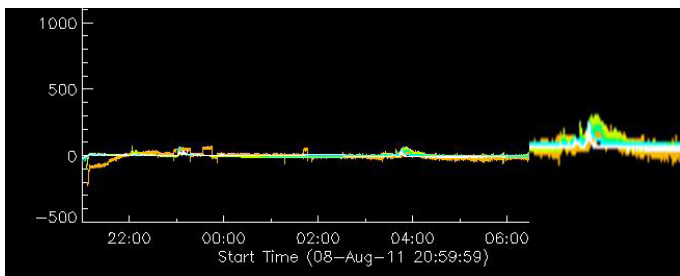


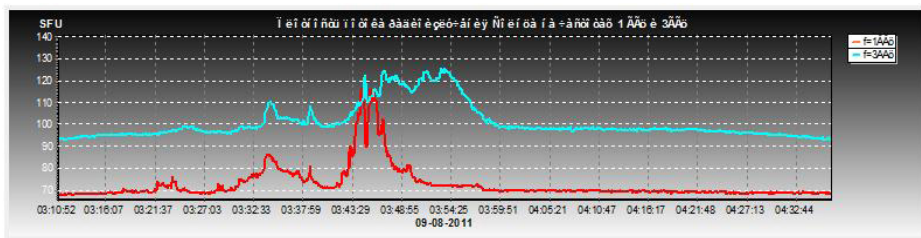
Рисунок 3 – Самая мощная вспышка в 24-ом 11-ти летнем солнечном цикле

На приводимых рисунках показаны возможности, разработанного в Институте ионосферы программного обеспечения для работы с данными о потоке радиоизлучения Солнца на частотах 1 и 3 ГГц. Ни один спектрограф из сети e-Callisto не зафиксировал всплесков в диапазоне 45-870 МГц. Но на более высоких частотах всплеск был и это видно на рисунке 4а., который получен в

Нобеяма, причем с тем же временным сдвигом по частоте.



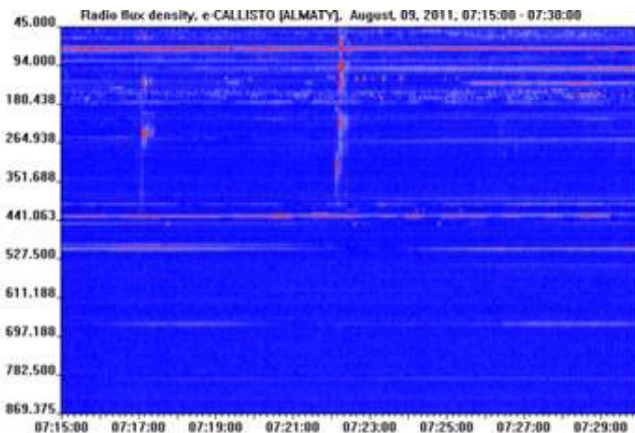
а.



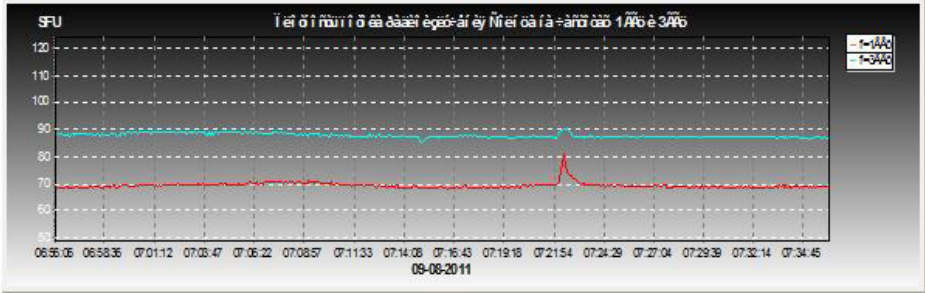
б.

Рисунок 4 – Всплеск, связанный со вспышкой M2.5 рентгеновского класса начало которой было в 03:19:00 UT а максимум был достигнут в 03:54:00 UT

На рисунке 5а. представлена спектральная картина всплеска в диапазоне 45-870 МГц связанного со вспышкой C1.4 рентгеновского класса, а на рисунке 6 б. запись потока радиоизлучения на частотах 1 и 3 ГГц. Видно, что совсем незначительное повышение уровня на высоких частотах соответствует всплеску III типа.

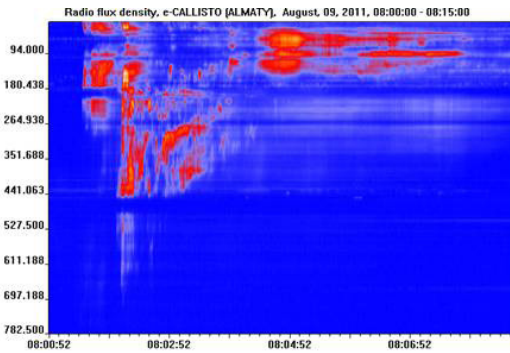


а.

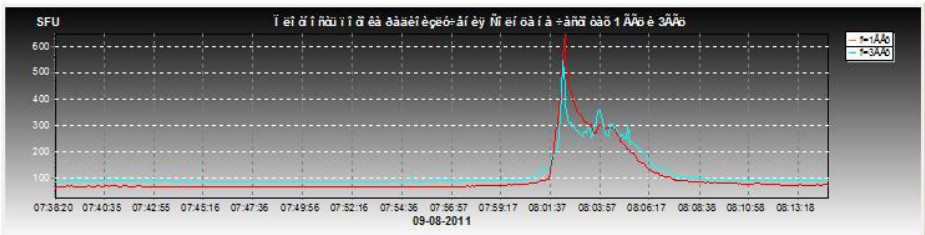


б.

Рисунок 5 – Всплеск связанный со вспышкой C1.4 рентгенового класса с началом в 07:19:00 и максимумом в 07:23:00 UT (а), спектрограмма 45-870МГц; поток на двух фиксированных частотах 1 и 3 ГГц (б)



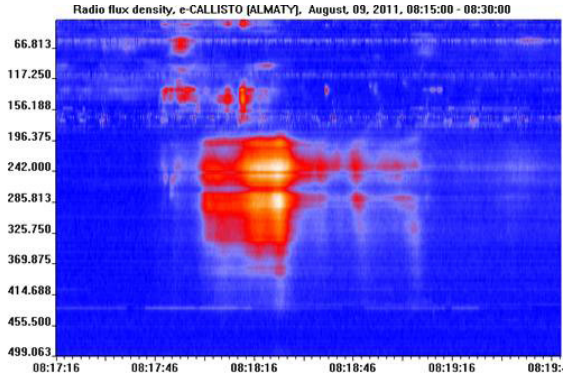
а.



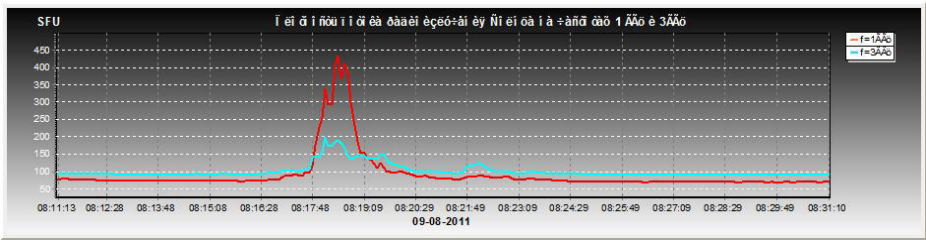
б.

а - динамический спектр, б –временной ход потока радиоизлучения на частотах 1 и 3 ГГц.

Рисунок 6 – Всплеск связанный со вспышкой X6.9 рентгенового класса которая началась в 07:48:00 UT, достигла максимума в 08:05:00 UT.



а.



б.

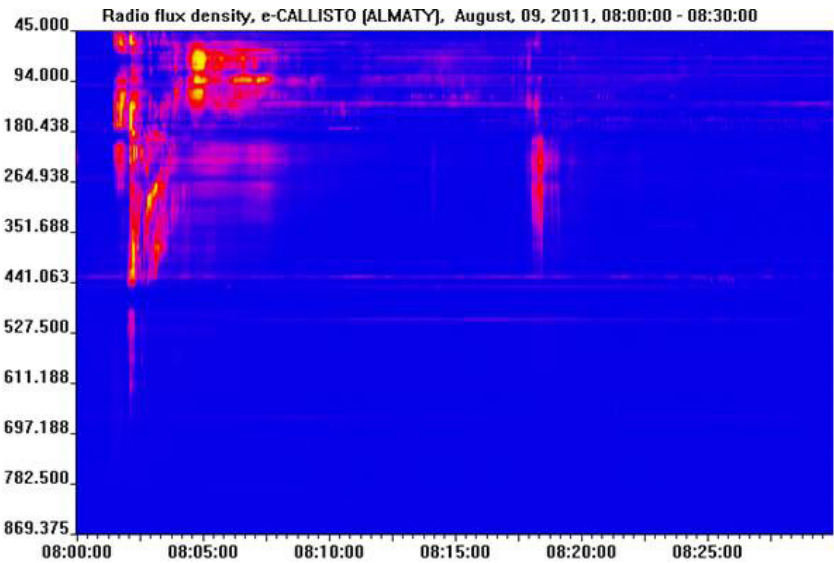


Рисунок 8 – Общий спектр событий 9 августа 2011 года

На приведенном выше рисунке можно видеть насколько сложный спектр радиоизлучения связанного со вспышкой класса X6.9. Здесь видно, что в начале идут всплески III типа со скоростью частотного дрейфа порядка 220 МГц/сек., затем всплеск II типа со второй гармоникой переходящий в континуум IV типа. Через 29 минут после начала всплеска, связанного со вспышкой класса X6.9 виден всплеск, который напрямую не связан со вспышкой в рентгеновском диапазоне и при детальном рассмотрении это всплеск IV типа переходящий в U образный всплеск (рисунок 7а.).

Заключение

Наблюдения радиоизлучения Солнца проводятся регулярно как на фиксированных длинах волн 10,7 и 27,8 см., так и спектрографом e-CALLISTO в диапазоне частот 45-870 МГц. Спектрограф входит в мировую сеть таких приборов, обеспечивая круглосуточный мониторинг солнечной активности. Из анализа спектров всех радиовсплесков, которые были зафиксированы за период работы радиоспектрографа, выявлено, что зафиксированы всплески II, III и IV типов. Каждое событие уникально. Используя общепринятое понятие о типах всплесков можно говорить только об общих характерных признаках каждого типа всплесков. Картина же каждого события индивидуальна. Любой всплеск может дать материал для определения параметров среды в активной области и механизма генерации того или иного типа всплеска. Нас же интересует важность, в прогностическом смысле, каждого типа всплесков. На основе изучения общепринятых механизмов генерации, наиболее продуктивными в этом смысле являются всплески II и III типов, которые генерируются либо на фронтах ударных волн возникающих при выбросах корональной массы - II тип, либо ускоренными электронами в солнечном ветре - III тип. В настоящее время отслеживается поведение как медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения в 24-ом цикле солнечной активности, так и спорадической компоненты, связанной непосредственно со вспышечной активностью Солнца. Все данные поступают в Центр прогноза космической погоды Института.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Исследовать особенности структуры и динамики магнитосферы, ионосферы и вариаций космических лучей с целью диагностики околоземного космического пространства».

Литература

1. *Гонтарев О.Г.* Характерные особенности квазипериодических колебаний потока радиоизлучения Солнца на волне 3,2 см и солнечная активность// Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Алма-Ата.–1975.–112с.
2. *Гонтарев О.Г.* Исследование флуктуаций пока радиоизлучения Солнца на волне 3,2 см// Изв. ВУЗов «Радиофизика». –1973. –Т. 16. –С.719-722.
3. *Безотосный А.А., Гонтарев О.Г., Ризов Е.Ф.* Измерение флуктуаций потока радиоизлучения Солнца на волне 3 см//Сб. «Ионосфера и солнечно-земные связи», «Наука», Алма-Ата. –1972. –С. 132-136.
4. *Гонтарев О.Г., Ильин А.Л.* Статистический анализ временных рядов, полученных при изучении флуктуаций потока радиоизлучения Солнца//Сб. «Ионосфера и солнечно-земные связи», Алма-Ата. –1972, № 4. –С.163-169//Деп. ВИНТИ. –1972, № 64. –С. 61-73.
5. *Гонтарев О.Г.* Модуляция S-компоненты радиоизлучения Солнца альфвеновскими волнами//Астрономический циркуляр. –1975, № 876. –С. 1-2.
6. *Гонтарев О.Г., Могилевский Э.И.* Колебания потока радиоизлучения и солнечная активность//Солнечные данные. –1975, № 6. –С. 72-79.
7. *Дин А.Б., Классен А.П.* Солнечный радиоспектральный комплекс диапазона 2-4 ГГц// Сб. Динамика ионосферы, часть 3. Изд-во «Гылым», Алма-Ата. –1991. –С. 134-138.
8. *Гонтарев О.Г., Классен А.П.* Солнечные данные// –1987, № 1. –С. 87.
9. *Безотосный А.А., Гонтарев О.Г.* Об одном методе компенсации влияния атмосферных водяных паров на регистрацию потока радиоизлучения Солнца на длине волны 3.2 см//Сб. Ионосфера и солнечно-земные связи. Изд-во «Наука», Алма-Ата. – 1980. –С. 129-131.
10. *Безотосный А.А.* Динамика спектров мощности КПК потока радиоизлучения Солнца на волне 3.2 см во время хромосферных вспышек//Сб. Ионосфера и солнечно-земные связи. Изд-во «Наука», Алма-Ата. –1980. –С. 132-138.
11. Модернизация технических средств радиополигона «Орбита»//Отчет закл. по Государственной программе «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы». Авторы Дробжев В.И. и др. Государственный регистрационный № 0105РК00135. Инв. № 0206РК00947, ДГП «Институт ионосферы», г. Алматы. Фонды НЦ НТИ МОН РК. 2006 г.
12. *Kryakunova O., Nikolayevskiy N., Andreev A., Gontarev O., Levin Yu., Malimbayev A., Nevskiy E., Sokolova O., Stepanov A., Shepetov A.* Kazakhstan space environment experimental complex for cosmic ray investigation//Abstracts of the 22-nd European Cosmic Ray Symposium ECRS-2010, University of Helsinki, Helsinki. –2010. –P.152.
13. *Дробжев В.И., Крякунова О.Н., Анашин В.С., Жумабаев Б.Т., Николаевский Н.Ф., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Гонтарев О.Г., Левин Ю.Н., Малимбаев А.М.,*

Оскомов В.В., Садыков Т.Х., Соколова О.И., Степанов А.В., Щепетов А.Л., Янке В.Г. Казахстанская сеть наземного и спутникового мониторинга околоземного космического пространства//Прикладные космические исследования в Казахстане. Коллективная монография. Серия «Казахстанские космические исследования». Алматы. –2010. –Т.6. –Гл. 3. –С. 199-206.

14. *Дробжжев В.И., Крякунова О.Н., Жумабаев Б.Т., Анашин В.С., Кузнецов В.Д., Николаевский Н.Ф., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Гонтарев О.Г., Гордиенко Г.И., Левин Ю.Н., Малимбаев А.М., Оскомов В.В., Садыков Т.Х., Соколова О.И., Степанов А.В., Щепетов А.Л., Яковец А.Ф., Янке В.Г.* Казахстанская система мониторинга и прогноза космической погоды//Материалы Международной конференции «Космос на благо человечества – взгляд в будущее». г. Астана. 6-7 января 2011 г.–С. 60-61.

15. *Гонтарев О. Г., Игнатенко А.И., Левин Ю.Н., Бобров М.В., Лыткин М.Е.* Первые всплески радиоизлучения Солнца в новом 11-ти летнем цикле солнечной активности//Известия НАН РК, Серия физико-математическая. –2001, № 4. –С. 140-145.

16. *Monstein С., Gontarev O., Zhumabaev B., Yakovets A., Levin Yu.* Callisto solar radiospectrometer at TSAO, Almaty, Kazakhstan//Известия НАН РК, Серия физико-математическая. –2011, № 4.–С. 121-128.

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОПЛЕРОВСКОГО МЕТОДА
ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В КАЗАХСТАНЕ

Краснов В.М., Салихов Н.М., Жумабаев Б.Т.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Представлена информация о развитии доплеровского метода исследования ионосферы в Казахстане.

Область применения результатов: физика ионосферы, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: ИОНОСФЕРА, ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Қазақстандағы ионосфераны зерттеуде доплерлік әдістің дамуы туралы ақпараттар таныстырылған.

Нәтижелерді қолдану аумағы: ионосфера физика, жер-сәулелік физика.

Кілттік сөздер: ИОНОСФЕРА, ДОПЛЕРЛІК ЭСЕР.

The paper presents information on Dopler method of ionosphere investigations in Kazakhstan .

The area of application of the results: physics of the ionosphere, solar-terrestrial physics.

Keywords: IONOSPHERE, DOPLER EFFECT

История развития физики во многом связывается с увеличением точности измерений. В этом отношении техника измерений частоты и времени на много порядков опередила другие виды физических измерений. На настоящее время общедоступные цезиевые или рубидиевые стандарты частоты способны обеспечить точность измерений. Использование техники частотных (фазовых) измерений нашло свое применение в самых различных областях физики. Особое место этот вид измерений занял при исследовании характеристик ионосферных возмущений. При распространении радиоволн через ионосферу, благодаря изменчивости во времени электронной концентрации, происходит изменение частоты радиоволны, наблюдается, так называемый, эффект Доплера. Чем больше скорость изменения электронной концентрации, тем больше наблюдаемая величина доплеровской частоты. Отсюда следует важное дополнительное преимущество доплеровских измерений – с их помощью открылась возможность изучать кратковременные эффекты в ионосфере. История развития доплеровского метода зондирования ионосферы тесно связана с развитием техники стандартов частоты и измерений частоты. Впервые доплеровские измерения частоты на наклонной трассе были проведены Эссеном в 1935г [1]. Однако интенсивные исследования ионосферы данным методом начались лишь с шестидесятых годов прошлого столетия, когда Davis, Watts и Zacharisen решили проблему обработки и представления данных [2,3]. С тех пор с помощью доплеровских измерений было получено большое количество данных о воздействии на ионосферу таких явлений как: всплески солнечных рентгеновских лучей, геомагнитные бури, акустико-гравитационные волны, взрывы, землетрясения, полеты ракет, цунами др. Обобщенные сведения об этом можно получить в периодически публикуемых обзорных работах [4-6].

В СССР первой публикацией, посвященной разработке теоретических вопросов исследования ионосферы доплеровским методом, следует считать работу Намазова, Новикова, Хмельницкого, опубликованную в 1974г [1]. Следует отметить, что к тому времени в СССР уже широко использовались фазовые методы вертикального зондирования ионосферы, основанные на измерениях разности фаз излучаемого и принимаемого сигнала. В этом случае не требуется высокая стабильность частоты опорных генераторов. К примеру, этот метод исследований широко использовался учеными кафедры «Физики» Московского государственного университета. В Секторе ионосферы АН Каз.ССР первым создал установку для проведения фазовых измерений и успешно проводил с ее

помощью исследования Э.Л. Афраймович [7]. Идея развития в Секторе ионосферы АН Каз.ССР непосредственно доплеровских измерений в диапазоне коротких волн (КВ) принадлежит заведующей М.П. Рудиной. В 1968г., после участия в работе конференции, где она слушала доклад С.А. Намазова, ей была поставлена соответствующая задача аспиранту В.М. Краснову. В качестве опорной частоты высокой стабильности предполагалось использовать радиосигнал от эталонного генератора на частоте 100кГц (впоследствии частоту изменили на 66.(6) кГц), передаваемый из Москвы Службой времени и частоты СССР. Предполагалось, что этот сигнал после переноса в КВ-диапазон обеспечит точность измерения. Однако первый опыт оказался неудачным. Небольшие изменения фазы на частоте 100кГц, обусловленные распространением радиоволны в D или нижней части E-слоя ионосферы, при умножении частоты до 5 МГц вносили сильные искажения в опорный сигнал. Реализовать идею удалось только при появлении в Секторе ионосферы опорного генератора со стабильностью частоты. Первая публикация об этой установке появилась в 1972г [8], и эта установка явилась первой в СССР. Результаты наблюдения записывались на самописец, а также после преобразования в код – на магнитофон. Одновременно с помощью аналогового анализатора помех определялась функция распределения амплитуды КВ – сигнала. Запись с магнитофона вводилась в ЭЦВМ, типа БЭСМ (разработка метода ввода, аппаратуры состыковки и программы была осуществлена Э.Л. Афраймовичем), где проходил расчет спектров несущей частоты КВ-сигналов и определялся доплеровский сдвиг частоты.

Первые исследования ионосферных возмущений показали ряд ограничений доплеровского метода. В частности, при традиционном доплеровском методе зондирования ионосферы для измерения частоты традиционно используются спектроанализаторы. Если передатчик излучает квазимонохроматический сигнал, то в общем случае из-за многолучевого распространения радиоволн через ионосферу на входе приемника имеем поле волны в виде:

$$a(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \left[\omega_n t + \int_0^t \omega_{di}(t) \dot{t} dt \right] \quad (1)$$

где a_i – амплитуда и $\omega_{di}(t)$ – доплеровский сдвиг частоты i -го луча, n – число принимаемых лучей, ω_n – частота, излучаемая передатчиком.

Перенося это колебание в область низких частот посредством синхронного детектирования и далее подавая его на спектроанализатор, согласно теоремы о

спектре суммы имеем:

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^n S_i(\omega)$$

$$\text{Колебание вида } a_i(t) \cos \left[(\omega_n - \omega_0)t + \int_0^t \omega_{di}(t) dt \right]$$

можно рассматривать как синусоиду, модулированную случайным образом по амплитуде и частоте, где ω_0 - частота опорного генератора приемника. В случае отсутствия модуляции, спектр i -го луча $S_i(\omega)$ должен представлять из себя одну спектральную линию. Наличие модуляции приводит к размытию спектральной линии. Таким образом, спектр каждого луча $S_i(\omega)$ должен занимать на графике спектральной плотности некоторый участок, положение которого и ширина определяется модулирующими свойствами ионосферы. В случаях, когда доплеровские сдвиги частоты лучей отличаются друг от друга на величины большие, чем ширина частот, занимаемая отдельными лучами, по графику $S(\omega)$ можно строго определить спектры каждого луча, а имея серию последовательных спектров функции $a(t)$ - проследить временные изменения доплеровского сдвига частоты и амплитуды каждого из лучей. В соответствии с описанной схемой обработки сигнала различают три типа погрешностей, обусловленных:

- конечностью ширины фильтра спектроанализатора,
- конечностью ширины размытия спектральной линии,
- перекрытием спектров отдельных лучей из-за недостаточного разнеса по частоте (интерференционные искажения).

Согласно многочисленным экспериментальным данным [7] в большинстве случаев разнос по частоте между лучами составляет величины 0.03-0.3 Гц. В результате на практике во временном ходе линии пиков зачастую перекрываются и прерываются. Поэтому оказывается невозможным проследить за изменениями доплеровского сдвига частоты отдельного луча. Ширина размытия спектральной линии разными авторами оценивалась по-разному [7-11]. Однако, по-видимому, ее оценка соответствует 0.01-0.1 Гц. Наиболее принципиальной для регистрации короткопериодных возмущений в ионосфере оказывается погрешность, связанная с погрешностью спектроанализатора δF , которая, как известно, равна $\delta F = 1/T_p$, где T_p - длительность реализации при спектральном анализе. Из этого выражения видно, что увеличение

точности измерений приводит к увеличению T_p и наоборот. Результаты экспериментальных исследований показывают, что, например, при взрывах реакция ионосферы на акустический импульс продолжается по времени от единиц до ста секунд. Предположим, что длительность волны фазы сжатия составляет 10с, и мы хотим на этом временном интервале получить пять отсчетов доплеровской частоты. Это значит, что каждый спектр зондирующего радиосигнала должен быть рассчитан за время $T_p \leq 2$ с. Тогда $\delta F \geq 0.5$ Гц. Если величины доплеровской частоты $fd(t)$ будут существенно превышать δF , то поставленная цель будет достигнута. Однако, на практике величины $fd(t)$ при отражении радиоволн от E-слоя ионосферы в большинстве случаев не превышают долей герца, а при отражении от F- слоя 2-3 Гц. Таким образом, детальное описание отклика доплеровской частоты на взрыв во многих случаях окажется невозможным. Традиционно, доплеровские установки, использующие спектроанализаторы для измерения частоты, имеют разрешающую способность ~ 0.1 Гц. Увеличение точности доплеровских измерений в Секторе ионосфере АН Каз. ССР проводилось по следующему направлению. Как известно, результирующая фаза сигнала многолучевого сигнала на входе приемника определяется выражением:

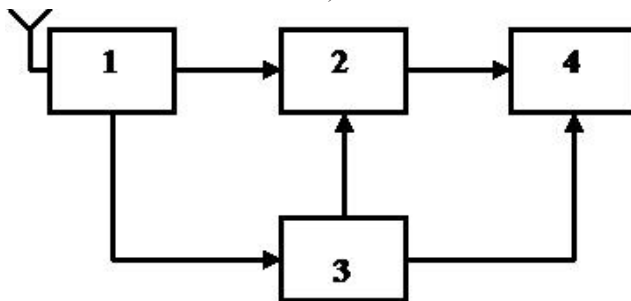
$$\varphi_s = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t)}{\sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t)} \quad (2)$$

где $\varphi_i(t)$ фаза i -го луча.

Из него видно, что результирующая фаза сложным образом зависит от амплитуд и фаз отдельных лучей и не представляется возможным определить доплеровский сдвиг частоты отдельных лучей. В случае же приема одного луча из (1-2) видно, что фаза сигнала φ_s является фазой одного косинусоидального колебания, и соответствующий набег частоты после дифференцирования фазы на выходе фазового детектора:

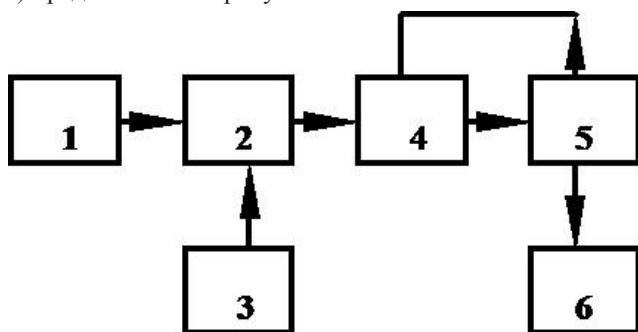
$F = 1/2\pi ((d\varphi_s)/dt - \omega_0)$ будет чисто доплеровским. При этом точность определения F не зависит от амплитуды сигнала, и будет определяться только точностью определения $\frac{d\varphi_s}{dt}$ и стабильностью частоты опорного генератора. Обе погрешности не являются принципиальными и могут быть весьма малыми величинами. Время дифференцирования процесса также может составлять малые величины. В результате оказывается возможным исследовать с большим

разрешением по времени и частоте кратковременные процессы в ионосфере. Однако для реализации этого метода измерения доплеровской частоты необходим надежный метод выделения однолучевых сеансов связи. Такой метод был разработан В.М. Красновым и опубликован в 1976г [12]. В работе показано, что необходимым признаком многолучевого сигнала является: спектр результирующей частоты колебаний поля сигнала шире спектра колебаний результирующей амплитуды. Достаточным условием однолучевого сигнала является: спектр результирующей частоты колебаний поля уже спектра результирующей амплитуды. Исследования показали, что случаи приема одного луча являются достаточно редкими, и данный вид аппаратуры не пригоден для проведения регулярных исследований ионосферы. Следующий шаг в развитие метода был сделан аспирантом Н.М. Салиховым. Ему удалось показать, что проведение фазовых измерений с использованием петли фазовой автоподстройки частоты и специального фильтра позволяет при приеме многолучевого сигнала выделять луч с максимальной амплитудой, и далее оказывается возможным проводить измерения доплеровской частоты этого луча [13]. Была создана аппаратура, реализующая этот метод измерений. Точность измерений доплеровской частоты, как минимум на порядок увеличилась по сравнению с традиционными методами. Она включает в себя передатчик КВ-диапазона, приемную часть и стойку обработки радиосигнала. Назначение передатчика: излучать высокостабильный ($\sim 10^{-9}f$) по частоте радиосигнал в диапазоне от 2 до 20 МГц. В качестве задающего генератора использован синтезатор частоты Ч6-31. Блок-схема приемной части показана на Рис.1. С помощью приемника -1 осуществляется прием КВ-сигнала и перенос его с помощью гетеродинирования (встроен опорный кварцевый генератор “Гиацинт” со стабильностью $\sim 10^{-9}f$) до частоты 215 кГц.



1-приемник , 2-смеситель, 3 - блок опорных частот, 4 - магнитофон.

В блоке опорных частот -3 из колебаний опорного генератора “Катрана” формируется частота 215 кГц и минутные метки. На вход смесителя -2 поступает сигнал с приемника на частоте 215 кГц - 125 Гц и опорное колебание - 215 кГц с блока -3. В результате на входе смесителя выделяется сигнал с частотой 125 Гц и подается на первый канал стереофонического магнитофона “Тембр-2М”. На второй канал магнитофона поступает опорная частота 125 Гц с блока -3 и минутные метки. В результате на магнитофоне оказывается записанный входной КВ-сигнал, гетеродинированный до частоты 125 гц. Блок схема стойки обработки сигнала (в создании аппаратуры стойки обработки также участвовал И.К. Идрисов) представлена на рисунке 2.



1 - магнитофон, 2- линейка смесителей, 3- блок опорных частот, 4- приемник, 5- система фазовой автоподстройки частоты,
6- аналого-цифровой преобразователь с ЭВМ.

Рисунок 2 - Стойка обработки сигнала

Сигналы с обоих каналов магнитофона -1 поступают на линейку смесителей -2, где с помощью опорных генераторов -3 и схемы компенсации устраняются помехи, связанные с неравномерностью протяжки ленты магнитофона и анализируемый сигнал переносится в область частот 215 кГц. С выхода смесителя - 2 преобразованный сигнал подается на вход усилителя промежуточной частоты 215 кГц приемника - 4. Петлей фазовой автоподстройки частоты -5 осуществляется подстройка частоты генератора “Ч6-31” под частоту принимаемого сигнала. С выхода системы автоподстройки напряжение пропорциональное частоте подается на аналогово-цифровой преобразователь и далее в ЭВМ. Кроме того в стойке имеется блок амплитудного детектирования КВ-сигнала и блок выделения меток. Напряжения с обоих блоков подаются также по отдельным каналам в аналогово-цифровой преобразователь и далее в ЭВМ. В качестве аналогово-цифрового преобразователя использован стандартный L-154. Для управления вводом

сигнала и первичной его обработки был создан необходимый пакет программ, в разработке которого, в том числе, участвовал Э.Б. Андабаев).

Отдельно необходимо подчеркнуть, что при зондировании в установке используется непрерывный квазимонохроматический сигнал. Это дает преимущество по сравнению с установками, использующими импульсный сигнал, так как область отражения импульсного сигнала занимает некоторый диапазон высот в ионосфере. В результате, возмущение интегрируется по высоте и теряется часть информации о «тонкой» структуре. Кроме того весьма затруднительно использовать импульсные сигналы для зондирования нижних слоев ионосферы, где под действием ионосферных возмущений изменения доплеровской частоты составляют величины порядка 0.1 Гц и меньше.

На основе разработанных методов измерений и аппаратуры проведены многочисленные исследования короткопериодных возмущений в ионосфере, инициированных различными источниками естественного и искусственного происхождения (включая пуски ракет, взрывы, движение солнечного терминатора, землетрясения и др.) подтвердивших на практике справедливость заложенных идей. В проведении доплеровских измерений в различные годы участвовали следующие сотрудники: В.М. Краснов, М.Ф. Баюклина, Н.М. Салихов, Ю.Г. Литвинов, В.С. Хачикян, Э.Б. Андабаев, И.К. Идрисов, Г.М. Пеленицын, М.З. Калиев, О.Е. Рясков, Е.В. Железняков, В.Л. Савельев и другие. Многие результаты измерений являются уникальными и среди них особое место занимают эксперименты с наземными химическими и подземными ядерными взрывами. Идея использовать доплеровское радиозондирование ионосферы для контроля акустических импульсов от подземных ядерных взрывов (ПЯВ) возникла, практически, одновременно в СССР, Франции и США в конце 70-х годов прошлого столетия. В частности, ученые Ливерморской Национальной Лаборатории (США) начали развивать теорию и создавать соответствующие модели распространения акустических волн в ионосферу и возмущений доплеровского сдвига частоты зондирующей радиоволны при подземных ядерных взрывах в 1977 году [14-15]. E.Blance из Франции опубликовала первую экспериментальную работу о воздействии ПЯВ на ионосферу в 1982 г [16]. Институт ионосферы АН Каз.ССР провел первую регистрацию ионосферного отклика на ПЯВ на Семипалатинском испытательном полигоне в 1978 г [17]. В первых измерениях участвовали: В.М. Краснов, Н.М. Салихов и В.С. Хачикян. Первая регистрация отклика ионосферы на наземный химический взрыв с помощью фазовых измерений

была осуществлена Barry G.H., Griffiths L.J. and Taenzer J.C. в 1966 году [18]. Ими впервые была доказана эффективность воздействия акустических волн от наземного химического взрыва на ионосферу. Для подтверждения этих результатов и получения более детальной картины о возмущениях в нейтральной атмосфере и ионосфере ученые США провели 16 сентября 1981г. специальный исследовательский химический взрыв Mill Race. В СССР первый исследовательский химический взрыв «МАССА» был проведен Сектором ионосферы АН КАЗ ССР под Алматы на два месяца позже - 28 ноября 1981г. [19]. Руководителем и главным организатором работ являлся В.И. Дробжев. Основное финансирование работ осуществлялось за счет хоздоговора с Ленинградским предприятием «Вектор» (куратор работ Ю.М. Русак) и в небольшой части - Институтом сейсмологии Узбекской ССР (куратор работ С.С. Хусамиддинов). В научном эксперименте участвовало 15 научно-исследовательских организаций СССР. Отмечалось, что наиболее подробно удалось исследовать ионосферные возмущения с помощью доплеровских измерений. Результаты экспериментов с взрывами сыграли решающую роль в создании теории распространения акустических волн в неоднородной атмосфере, их влияния на ионосферную плазму и токовые системы. В практическом плане, результаты, полученные при регистрации ионосферных возмущений во время промышленных химических и подземных ядерных взрывов послужили основой для разработки дистанционного ионосферного метода контроля взрывов.

В период перестройки аппаратура доплеровских измерений была разукрупнена, и только в настоящее время осуществляется ее восстановление на основе новой элементной базы и нового типа ЭВМ. Необходимость в ней возникла, прежде всего, для решения задач Стратегического плана Национального космического агентства Республики Казахстан: Стратегическое направление 2. Развитие научной и научно-технологической базы космической деятельности. Задача 2.1.1. Развитие научной и опытно-экспериментальной базы космических исследований. В частности, на сегодняшний день считается, что одним из перспективных методов исследований динамических процессов в литосфере, включая проблему прогнозирования землетрясений является использование научных спутников. Несомненно, что научный спутник сможет обеспечить большой комплекс наблюдений над сейсмическими регионами Казахстана. Вместе с тем непрерывный мониторинг ионосферных возмущений непосредственно над конкретным очагом землетрясения с помощью спутника невозможен, в виду особенностей траектории его полета. В этом случае важным дополнением

спутниковых наблюдений может явиться непрерывный мониторинг ионосферы над Алматинским сейсмическим регионом с помощью наземного диагностического комплекса доплеровского радиозондирования ионосферы сигналом КВ-диапазона на слабонаклонной трассе. Возможность проведения доплеровских наблюдений на наклонной трассе позволяет организовать область зондирования ионосферы непосредственно над предполагаемым очагом землетрясения. При этом при одном передатчике можно организовать несколько приемных пунктов, и тем самым обеспечить еще и измерение пространственных характеристик ионосферных возмущений. Необходимо также отметить, что спутники проводят измерения возмущений на высотах 500-700 км. Поэтому важным дополнением спутниковых измерений является возможность регистрировать ионосферные возмущения на более низких высотах: 100-300км. Можно предположить, что возмущения, распространяющиеся вверх от земной поверхности, будут иметь большую амплитуду на меньших высотах, и это обеспечит большую вероятность их выделения на уровне шумов.

Высокая чувствительность доплеровских измерений и возможность регистрации кратковременных эффектов может позволить выделить аномалии перед сильными землетрясениями, установить закономерность их появления, связать их с результатами спутниковых наблюдений и, в конечном счете, разработать автоматизированную систему их обнаружения и идентификации.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Исследовать взаимосвязь динамических процессов в атмосфере с процессами естественного и антропогенного происхождения на Земле».

Литература

1. *Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А.* Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых волн//Препринт ИЗМИРАН СССР. –1974, №2 (87). –28с.
2. *Watts J.M. , Davis K.* Rapid frequency analysis of fading radio signals// J. Geophys. Res. –1960. –Vol.65. –P.2295-2299.
3. *Davis K., Watts J.M. and Zacharisen.* A study of F2 layer effects as observed with a doppler technique // J. Geophys. Res. –1962. –Vol.67, № 2. –P. 601-609.
4. *Blanc E.* Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary’// Ann. Geophysicae. –1985. –Vol. 3. –P. 673-688.
5. *Pokhotelov, O.A., M. Parrot, E.N. Fedorov, V.A.Pilipenko, V.V. Surkov, and*

- V.A. Gladyshev*, Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources// Ann. Geophysicae. –1995. –Vol. 13. –P. 1197-1210.
6. *Krasnov V.M., Drobzheva Ya.V., Laštovička J.* Recent advances and difficulties of infrasonic wave investigation in the ionosphere//Surveys in Geophysics. –2006. –Vol. 27. –P.169-209. DOI 10.1007/s10712-005-6203-4.
7. *Афраймович Э.Л.* Интерференционные методы радиозондирования ионосферы// Наука. М. –1982. –198 с.
8. *Краснов В.М.* Аппаратура для исследования доплеровского сдвига частоты в КВ диапазоне//Ионосфера и солнечно-земные связи. Наука, Алма-Ата. –1972. –С.60-63.
9. *Lomax J.B.* HF propagation dispersion phase and frequency instabilities in electromagnetic wave propagation//AGARD Conference Proceedings. –1970. –No 33. –P.497-503.
10. *Баюклина М.Ф., Краснов В.М.* Точность доплеровских измерений в КВ диапазоне // Радиот. и электр. –1977. –Т.22, № 5. –С.957-962.
11. *Краснов В.М.* К вопросу о методике измерений ширины размытия спектральной линии КВ-сигналов в ионосфере// Ионосфера и солнечно-земные связи. Наука. Алма-Ата. –1977. –С. 89-93.
12. *Краснов В.М.* Метод выделения однолучевых сеансов связи//Радиотехника и электроника. –1976, №3. –С.600-602.
13. *Салихов Н.М.* Отклик ионосферы на акустические источники возмущений естественного и искусственного происхождения\\Канд. диссерт. Алма-Ата. –1984. –165 с.
14. *Warshaw S.I., P.F. Dubois P.F.* Preliminary theoretical acoustic and RF sounding calculation for Mill Race// LLNL USA. –1981, Report 550. –20 p.
15. *Warshaw S.I., Dubois P.F.* Ionospheric detection of explosion//Lawrence Livermore National Laboratory, Energy and Technology Review.–1983, May, Issue.
16. *Blance E.* Neutral temperature and electron density measurements in the low E region by vertical HF sounding in the presence of an acoustic wave// Geophysical Research Letters. –1982 –Vol.9, № 4. –P. 450-453.
17. *Krasnov V.M., Drobzheva Ya.V. and Laštovička J.* Recent advances and difficulties of infrasonic wave investigation in the ionosphere//Surveys in Geophysics// –2006 27: 169-209. DOI 10.1007/s10712-005-6203-4.
18. *Barry G.H., Griffiths L.J. and Taenzer J.C.* HF radio measurements of high-altitude acoustic waves from a ground-level explosion // J. Geophys. Res. –1966. –Vol.71. –No 17. –P.4173-4182.
19. *Альперович Л.С., Вугмейстер Б.О., Гохберг М.Б., Дробжев В.И., Ерущенков А.И., Иванов Е.А., Кудрявцев В.П., Куличков С.Н., Краснов В.М., Матвеев А.К., Мордухович М.И., Нагорский П.М., Е.А. Погмарев, Похотелов О.А., Таращук Ю.Е., Троицкая В.А., Г.В. Федорович Г.В.* Об опыте моделирования магнитосферно-ионосферных эффектов при сейсмических явлениях // Доклады АН СССР. –1983. –Т.269, № 3. –С.573-578.

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОВОЛН КИЛОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА И ИОНОСФЕРНОМ
МЕТОДЕ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Козин¹ И.Д., Васильев² И.В., Федулина¹ И.Н.

¹Алматинский университет энергетики и связи, Алматы

²ТОО СКТЬ «ГРАНИТ», Алматы

Приведена информация об исследовании нижней ионосферы и вопросов распространения радиоволн в Казахстане. Кратко рассмотрены основные эффекты в ионосфере, предшествующие мощным сейсмическим явлениям, и методы их регистрации. Предложен новый ионосферный метод предвестников землетрясений.

Область применения результатов: литосферно-ионосферные связи

Ключевые слова: ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ИОНОСФЕРА, ПРОГНОЗ

Қуатты сейсмикалық құбылыстар алдында ионосферадағы негізгі әсері қысқаша көрсетілген, және оны тіркеу тәсілдері көрсетілген. Жер сілкінісін болжаудың жаңа ионосфералық тәсілі ұсынылған.

Нәтижелерді қолдану аумағы: литосфералық-ионосфералық байланыстар.

Кілттік сөздер: ЖЕР СІЛКІНІСІ, ИОНОСФЕРА, БОЛЖАУ.

An information on the development in Kazakhstan the research on the lower ionosphere and radiowave propagation is given. It is briefly considered the main effects in the ionosphere, which preceding powerful seismic events and also methods of their registration. It is suggested a new method of ionospheric precursors of earthquakes.

The area of results applications: lithosphere-ionosphere coupling

Key words: LOWER IONOSPHERE, EARTHQUAKE PREDICTION

Немного истории

Начиная с 1961 года – создания «Сектора ионосферы» АН Каз ССР, к основным регулярным измерениям отнесли поглощение коротких радиоволн при вертикальном зондировании. Поскольку при распространении до ионосферы и обратно к земле короткие радиоволны испытывают отклоняющее и неотклоняющее поглощения, введение в строй измерительной установки можно считать началом исследований нижней ионосферы, где и происходит неотклоняющее поглощение радиоволн. Именно из-за резкого возрастания электронной концентрации в нижней ионосфере при солнечных вспышках происходит нарушение радиосвязи, названное эффектом Делинджера. Уже в 1961 году была поставлена задача об автоматизации измерений и обработки данных отражённых от ионосферы радиосигналов. В отсутствие аналогово-цифровых преобразователей задача была успешно решена [1]. Единственной достоверной информацией о состоянии нижней ионосферы были наблюдения спорадических слоёв области E. Уже тогда была обнаружена корреляция предельных частот отражения с интенсивностью космических лучей [2]. Большой вклад в исследование нижней ионосферы внес д.физ.-мат.н. профессор математического Института им. Стеклова П.Е. Краснушкин, изучая условия распространения сверхдлинных радиоволн (СДВ). На трех комплексных магнито-ионосферных станциях Казахстана, усилиями В.И. Дробжева и И.Д. Козина были развёрнуты измерения СВД сигналов. Сотрудник Сектора ионосферы А.И. Игнатенко создал уникальную установку по регистрации принимаемых радиоволн во всём спектре СДВ и длинноволнового (ДВ) диапазонов [3], что позволило получить ряд новых научных результатов [4, 5]. Активно проводилось изучение динамики нижней ионосферы, где был получен ряд оригинальных результатов И.Д. Козиныным, Г.И. Герасимовым и Б.А. Туркеевой [6], а также изучение взаимодействия электромагнитной и корпускулярной радиации Солнца с нижними слоями ионосферы. Основные результаты по воздействию рентгеновских излучений были получены Б.А. Туркеевой, а по воздействию корпускулярных потоков солнечного и галактического происхождения - Б.Т. Жумабаевым.

Существенный вклад в изучении распространения радиоволн внесли исследования на базе синхронной сети ДВ-радиостанций. О значимости и масштабе этих исследований для Казахстана говорит факт непосредственного курирования этих работ первым заместителем Министра Связи КазССР - А.М. Тунгушбаевым, участия в работах директора РУРТа Касымбекова А.К., первого

заместителя - Г.А. Аракелова, главного инженера и организатора первой сотовой сети связи в Казахстане - Я.Л. Дрибинского. Исследования внесли существенный вклад в существующие представления об электрических свойствах земной поверхности территории Казахстана, доказали существенное влияние на них подземных вод, изучили вопрос об излучаемых мощностях радиовещательных станций.

О методе прогноза землетрясений по ионосферным данным. В настоящее время обнаружено два вида ионосферных возмущений в связи с землетрясениями [7-13]:

1. Изменения плотности электронной концентрации $[N_e, \text{м}^{-3}]$ слоёв ионосферы на десятки процентов, которые захватывают вблизи области грядущего землетрясения области около 15° по широте и до 30° по долготе.

2. Периодические колебания электронной концентрации, вызываемые идущими из очага подготавливаемого землетрясения акустико-гравитационными волнами с частотой 150 Гц – 15 кГц.

Указанные изменения происходят во всей толще ионосферы над эпицентром землетрясения и обнаруживаются на всех радиочастотах, отражающихся от ионосферы или проходящих сквозь неё. Вероятности возникновения и обнаружения ионосферных аномалий над эпицентром готовящегося землетрясения с помощью радиоволн близки к 0,9 [10].

Состояние ионосферных прогнозов землетрясений. Наибольшее распространение получили 4 способа регистрации ионосферных предвестников землетрясений.

I. Регистрация параметров радиоволн ДВ- и СДВ-диапазонов, распространяющихся над районами ожидаемого землетрясения [11, 12]. Для реализации этого способа создают или используют имеющуюся сеть радиотрасс, состоящих из набора низкочастотных передатчиков и приёмников. В каждой из N точек приёма осуществляют измерение сигналов, обнаруживают характерные отклонения характеристик радиосигналов (задержки, фазовые вариации и т.п.), определяют район ожидаемого землетрясения. Недостатками способов [11, 12] являются:

- использовавшаяся ранее сеть СДВ-станций «Омега» прекратила своё существование. Резко уменьшилась сеть ДВ-радиовещания;

- создание специализированных низкочастотных передатчиков, имеющих большие габариты антенных и приемо-передающих устройств требует значительных финансовых затрат. Приемо-передающие устройства этих диапазонов

длин волн отличаются высокой потребляемой мощностью;

- имеются трудности оптимального размещения передающих устройств, создаваемые рельефом исследуемой области, расположением населенных пунктов и источников электроэнергии;

- существенные по размерам зоны Френеля ограничивают точность определения координат ожидаемого землетрясения.

II. Регистрация электростатического потенциала внешней поверхности космических аппаратов, наводимого при их пролёте непосредственно через области ионосферных образований [13]. В этом способе формируют изображение участка ионосферы в виде функции дискретных отсчётов амплитуды сигнала $A(x, y)$ от пространственных координат из отдельных регистраций электронной плотности ионосферы, получаемых путём квантования, с темпом не ниже 100 изм/с. Выделяют методами пространственного дифференцирования контурные рисунки на синтезированном изображении, вычисляют морфологические характеристики синтезированного изображения внутри выделенных контуров и по совокупности вычисленных характеристик судят о принадлежности выделенного участка ионосферы к проекции литосферного очага землетрясения на ионосферу. Недостатками способа [13] являются:

- трудность технической реализации незаземленной внешней поверхности КА от его корпуса, который представляет собой нулевую точку потенциала;

- не обеспечивается прогноз количественных значений характеристик ожидаемого землетрясения;

- для реализации способа необходимо наличие отдельной низкоорбитальной группировки космических аппаратов с орбитами, проходящими непосредственно через области ионосферных образований. Срок существования низкоорбитальных систем невелик, невелико и время пребывания таких спутников в зоне видимости приёмника..

III. Регистрация на ИСЗ низкочастотных колебаний, распространяющихся по силовым линиям магнитного поля Земли [14, 15].

Обнаруживается появление низкочастотных радиосигналов с квазипериодическими колебаниями амплитуды. Спутниковые координаты по силовой линии магнитного поля Земли проектируются на земную поверхность, где и прогнозируется землетрясение. Недостатками способов [14, 15] являются:

- малое время нахождения движущегося спутника у магнитной силовой линии, проходящей через сейсмоактивный район;

- узкий контролируемый географический диапазон особенно по широте. Вероятные размеры зоны регистрации излучений относительно эпицентра составляют по широте лишь $\pm 2^\circ$.

- требуется специализированное оборудование, устанавливаемое на борту ИСЗ, по обработке регистрируемой информации, проведению анализа, вынесению решения и передачи его на земную станцию.

IV. Регистрация на наземном пункте периодических колебаний координат, используя спутниковую навигационную систему GPS или ГЛОНАСС [16]. Для реализации этого способа размещают в сейсмоопасном районе приёмные станции космической навигационной системы, разнесённые на протяженной измерительной базе, осуществляют непрерывное высокоточное измерение координат (x_i, y_i, z_i) точек размещения приёмных станций, регистрируют момент появления периодических отклонений $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ координат точек, отслеживают изменение этих отклонений во времени, вычисляют гипотетический фазовый центр волн как точку пересечения радиус-векторов в пространстве и отождествляют его с центром очага. Определяют время появления периодических отклонений координат точек, и магнитуду M ожидаемого землетрясения.

Недостатками способа [16] являются:

- математическая некорректность регрессионных зависимостей, в частности, чем больше период T , тем, в соответствии с формулой Гутенберга-Рихтера, магнитуда ожидаемого землетрясения должна быть больше;

- из 4-5 навигационных сигналов лишь один проходит через ионосферу над очагом землетрясения;

- может оказаться, что ни один из сигналов не затронет возмущенной области ионосферы;

- решение принимается по одному литосферному признаку-предвестнику, в то время как для повышения достоверности целесообразно использовать всю гамму признаков, в том числе и ионосферные признаки-предвестники.

В работе [17] осуществляют измерение фазовой поправки $\Delta\Phi$ на время распространения радиосигнала в плазменной среде ионосферы при расчёте псевдодальностей в космической навигационной системе GPS. Отслеживают дисперсии данного параметра на восходящих и нисходящих витках орбит космического аппарата с нескольких пунктов местоопределения. Прогнозируют характеристики предстоящего удара по функции изменения огибающей дисперсии наблюдаемого параметра во времени. Недостатками [17] являются:

- координаты навигационного приемника вычисляются по измерениям его удаления, как минимум, от четырех НИСЗ. Принимаемые при этом сигналы НИСЗ проходят через различные участки ионосферы, и лишь один из лучей может проходить через ионосферу над очагом землетрясения;

- разнесенные в пространстве приемники могут определять своё местоположение по сигналам различных групп НИСЗ;

- навигационные спутники находятся в движении и радиосигналы в каждый новый момент времени проходят через различные ионосферные области.

Способ регистрации ионосферных предвестников землетрясений. Техническая сущность предлагаемого способа состоит в следующем. Вдоль зоны очагов землетрясений, выявленной по многолетним сейсмологическим данным, устанавливается сеть приемных устройств. Диаграммы направленности антенн позволяют принимать сигналы от $m \geq 1$ геостационарных спутников (рисунок 1), излучающих на частотах десятки или сотни МГц. Если еще до начала основного толчка землетрясения, в приповерхностном слое атмосферы возникнут акустико-гравитационные волны, они приведут к возникновению плазменных волн электронной концентрации в ионосфере. Каким бы ни был механизм взаимодействия литосферных волн очага землетрясения с возникающими ионосферными аномалиями, с различной степенью достоверности можно утверждать о корреляционной зависимости параметров ионосферной аномалии: пространственной протяженности, турбулентности, направления распространения плазменных волн с характеристиками ожидаемого землетрясения: местом, временем, магнитудой. Нарастающая амплитуда литосферных волн очага приводит к возрастающей турбулентности электронной концентрации в слоях ионосферы и регистрируется в первую очередь приемником, расположенным наиболее близко к возмущенной области ионосферы. Характеристики радиосигнала отображают состояние электронной концентрации в ионосфере и содержат скрытую информацию о параметрах ожидаемого землетрясения. Полной характеристикой турбулентности является амплитуда периодических изменений принимаемого радиосигнала. По физическому смыслу дисперсия процесса есть мощность его переменной составляющей. Отслеживая изменение мощности переменной составляющей во времени, рассчитывают функцию переходного процесса.

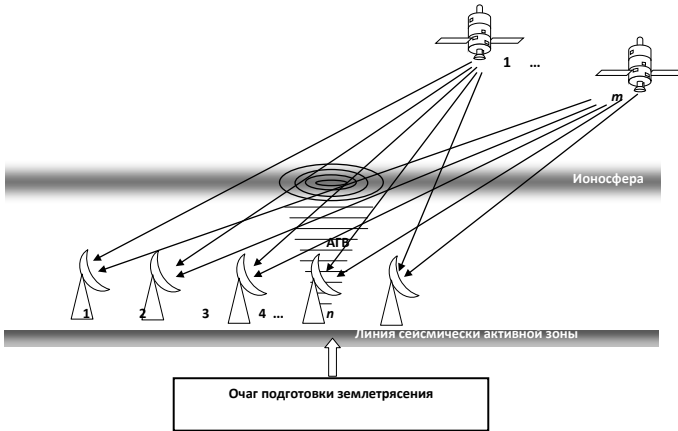


Рисунок 1 - Схема размещения регистрирующей аппаратуры

Возможны два варианта ионосферных измерений для прогнозов землетрясений.

1. Поглощение энергии радиоволны, проходящей через ионосферу, имеет прямую зависимость от интегральной электронной концентрации N_e в ней

$$E_i = E_0 \exp \left\{ - \int_s^{s_1} \frac{N_e v}{v^2 + \omega_i^2} d s \right\}$$

где v - частота соударений электронов с нейтральными молекулами атмосферного газа, ω - круговая частота радиоволны, s - наклонная протяжённость распространения радиоволны в ионосфере. В данной реализации способа используется приём одной частоты с одного спутника.

С частотой F осуществляется приём радиосигналов геостационарного спутника на одной частоте f_1 , измеряется текущая амплитуда этого сигнала E_i . Результаты измерений записываются в блок памяти, в котором сохраняются значения лишь за последние 5 суток. При добавлении нового числа первое число, находящееся в памяти, стирается. По данным памяти строится суточное медианное распределение $E_{i,m}$. Определяется относительная разность этого сигнала и скользящего по 5 предыдущим суткам медианного значения $E_{i,m}$

$$\delta E_i = \frac{E_i - E_{i,m}}{E_{i,m}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Превышение относительной величины δE_i порогового значения для измеряемого момента времени служит первым признаком возможно

приближающегося землетрясения. Текущий ряд значений δE_i подвергается спектральному анализу. Появление колебаний амплитуды сигнала в ожидаемом диапазоне частот 150 Гц – 15 кГц является вторым признаком приближающегося землетрясения. Значит, частота регистрации характеристик принимаемых радиосигналов должна быть в 2 раз большей верхнему пределу ожидаемой частоты АГВ, т.е. $F=30$ кГц. Регистрация указанных особенностей ионосферы над приёмником по сигналам второго спутника увеличивает вероятность прогноза.

2. Осуществляется приём радиосигналов геостационарного спутника на двух частотах f_1 и f_2 , определяется фазовый сдвиг между ними

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = 4 \cdot 0,3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \int_h N_e(h) dh$$

из которого рассчитывается текущая величина полного электронного содержания ПЭС

$$\text{ПЭС} = \int_h N_e(h) dh$$

Между величиной измеряемой фазовой задержки и интегральной плотностью электронной концентрации на трассе распространения сигнала существует линейная зависимость. Если измерять фазовую задержку на одних и тех же трассах (одних и тех же наклонных дальностях) то $\Delta\Phi$ будет зависеть только от текущей плотности электронной концентрации ионосферы, т.е. представляется возможность отследить изменение параметра N_e во времени в данной точке пространства. Аналогично уравнению (1) рассчитываются относительные отклонения ПЭС от медианных значений, регистрируется превышение абсолютной вариации ПЭС над пороговым значением и наличие спектральных составляющих, по которым выдается прогноз возможного землетрясения. Регистрация указанных особенностей над приёмником по сигналам второго спутника увеличивает вероятность прогноза. Блок-схема регистрирующей установки приведена на рисунке 2. Генератор синхроимпульсов задает частоту опроса в $F=30$ кГц. Оцифрованные данные амплитуды сигнала (при одночастотном способе измерений) или фазового сдвига (при двухчастотном способе измерений) поступают на накопительное устройство. Скользящее накопление содержит данные за 5 суток. Из этих данных рассчитывается медианное значение и спектральные составляющие. Устойчивая разность показаний приемника и медианы, а также присутствие периодических колебаний принимаемого сигнала могут служить основание для прогноза приближающегося землетрясения.

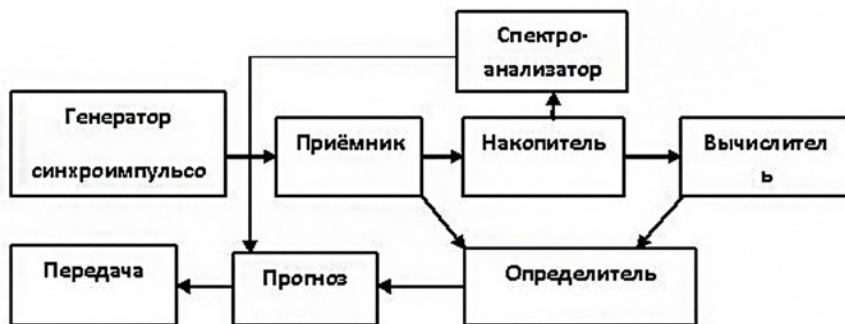


Рисунок 2 - Блок схема регистрирующей установки.

На рисунке 3 приведена условная запись изменений критических частот ионосферного слоя F2 в спокойных и возмущенных приближающимся землетрясением условиях [14]. Критические частоты являются мерой электронной концентрации в ионосфере. Показано как общее понижение электронной концентрации, так и периодические её колебания, какие и ожидаются в предлагаемом способе регионального прогноза землетрясений.

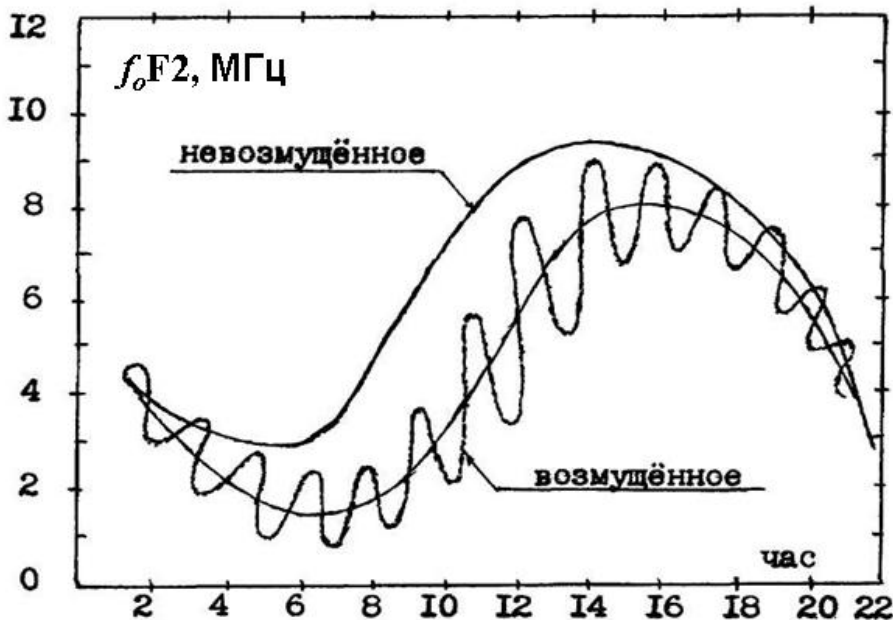


Рисунок 3 - Примерное поведение электронной концентрации в ионосфере в период подготовки землетрясения

Ионосферное преобразование акустических и акустико-гравитационных волн в электромагнитные волны. Известно, что сейсмические акустико-гравитационные волны, возникающие до начала землетрясений, регистрируются на ИСЗ в виде низкочастотных электромагнитных колебаний. То есть происходит преобразование одного вида волн в другие виды. Поглощение радиоволн в ионосфере объясняют через механизм преобразования их энергии в механическую энергию. Электромагнитная волна приводит к синхронному колебательному движению свободных электронов. Столкновение электронов с нейтральными молекулами воздуха приводит к поглощению электромагнитной энергии радиоволны. Имеются соответствующие формулы. Как видим, второе преобразование энергии начинается с механических колебаний, которое в ионосфере преобразуется в электромагнитное колебание. Именно этот механизм работает в процессе преобразования сейсмических колебаний в электромагнитные.

Таким образом, возможна реализация способа прогнозирования землетрясений, при котором размещают в сейсмоопасном регионе приемные станции космической радиосвязи системы, разнесенные на измерительных базах вдоль линии максимальной сейсмической активности, регистрируют момент появления периодических отклонений характеристик принимаемых с геостационарных спутников сигналы, прогнозируют характеристики и место ожидаемого землетрясения.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы “Исследование воздействия космической погоды на распространение радиоволн”

Литература

1. *Козин И.Д.* Автоматический метод регистрации средней амплитуды отраженного от ионосферы сигнала. // Ионосферные исследования, М.: 1964, №13.
2. *Козин И.Д. А.П. Серегина.* Спорадический слой E по наблюдениям за периоды МГГ, МГС, МГСС. // Труды Всесоюзной конференции по физике ионосферы, Алма-Ата, 1965.
3. *Козин И.Д.* Измерение напряженности дальнего поля СДВ на многих частотах. // Ионосфера и солнечно-земные связи, «Наука» КазССР, 1972.
4. *Козин И.Д.* Упрощенный метод измерения фазы ионосферных сигналов радиостанций ДВ- и СДВ-диапазонов. // Труды II конференции молодых ученых АН КазССР, 1970.
5. *Козин И.Д., Закишев О.* Абсолютные измерения и вариации дальнего поля СДВ на территории Казахстана. // Труды II конференции молодых ученых

АН КазССР, 1970.

6. *В. Аксельрод, Г. Герасимов, И.Д. Козин, М. Рудина, Б. Туркеева.* Динамика нижней ионосферы. «Наука» КазССР, 1975.

7. *Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А.* Электромагнитные предвестники в системе прогноза землетрясений: поиски, проблемы // *Вестн. АН СССР.* 1987. №3. С. 43-53.

8. *Гуфельд И.Л., Добровольский И.П.* Модель подготовки корового землетрясения // *Докл. АН СССР.* 1981. № 260(1). С.51-55.

9. *Соболев Г.А.* Проблема прогноза землетрясений // *Природа.* 1989. №12. С. 47-55.

10. *Кузнецов В.Д., Ружин Ю.Я.* Изучение ионосферных явлений, предшествующих землетрясениям и другим природным и техногенным катастрофам (проект ВУЛКАН) // *Распространение радиоволн. Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции. Йошкар-Ола 25-27 мая 2005 г., т. 1. Йошкар-Ола. МарГТУ.* 2005. С. 27-38.

11. *Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф. и др.* Об исследованиях сейсмоионосферных взаимодействий методом просвечивания волновода Земля-ионосфера на СДВ // *Распространение радиоволн километрового диапазона. Апатиты.* 1987. С.106-108.

12. *Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Ямпольский В.С.* Статистический анализ связи возмущений фазы сигналов ФНРС “Омега” с сейсмотектоническим процессом: Препринт. М.: 1989. 11 с.

13. *Давыдов В.Ф., Шалаев В.С., Чесноков А.Г. и др.* Способ обнаружения очагов землетрясений. // Патент RU № 2217779, G 01 V 9/00, 2003.

14. *Маркина В.И., А.В. Наливайко, Н.И. Гершензон и др.* Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1983. т. 23. С. 842.

15. *Молчанов О.А.* Прохождение электромагнитных полей от сейсмических источников в верхнюю ионосферу Земли // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1991. т. 31. С. 111-119.

16. *Шахраманьян М.А.; Машимов М.М.; Нигметов Г.М.; Давыдов В.Ф.* Способ предсказания землетрясений // Патент RU № 2170446, G 01 V 9/00, 200.

17. *Давыдов В.Ф., Никитин А.Н., Новоселов О.Н., Галкин Ю.С.* Способ прогноза землетрясений // Патент RU № 2273869, G 01 V 9/00, 2006 г.

18. *Seismicity catalog, V.2, Global and regional, 2150, В.С. 1998, А.Д.*

ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «АЛМА-АТА»
ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Соколова О.И.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Дан краткий анализ тенденций и современного состояния исследования геомагнитного поля на территории Республики Казахстан. История измерений магнитного поля Земли в Институте ионосферы.

Область применения результатов: геомагнитное поле, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, СЕТЬ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

Дан краткий анализ тенденций и современного состояния исследования геомагнитного поля на территории Республики Казахстан. История измерений магнитного поля Земли в Институте ионосферы.

Область применения результатов: геомагнитное поле, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, СЕТЬ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

A brief analysis of trends and the current state of research on the geomagnetic field. The history of measurements of the magnetic field of the Earth Institute of the ionosphere.

The area of application of the results: geomagnetic field models, solar-terrestrial physics

Keywords: GEOMAGNETIC FIELD, NETWORK OF MAGNETIC OBSERVATORIES.

История изучения геомагнитного поля по данным обсерватории «Алма-Ата»

Геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» была введена в эксплуатацию в 1963 г. в бывшем Секторе Ионосферы АН Каз. ССР – ныне ДТОО «Институт ионосферы». Расположена обсерватория в предгорьях г. Алматы на высоте 1300 м над уровнем моря, географические координаты [43.25°N; 76.95°E], геомагнитные координаты [34.3°N; 152.7°E]. Обсерватория включает три павильона: Var - вариационный, ABS - абсолютный, Tech - технический (главный) (рисунок 1).

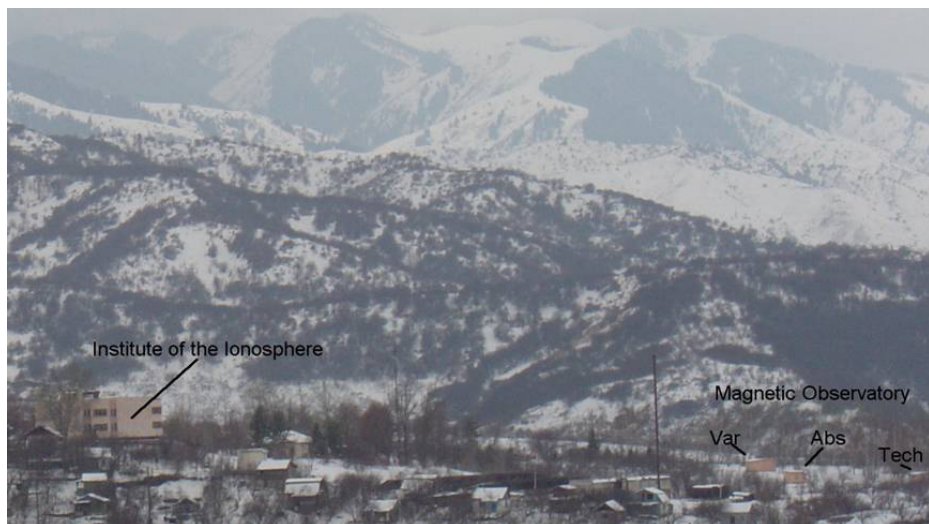


Рисунок 1 – Расположение геомагнитной обсерватории «Алма-Ата»

На рисунке 2 приведены фотоснимки магнитных павильонов и аппаратуры обсерватории на момент ее создания (1963г). Данные геомагнитной обсерватории активно использовались с начала создания обсерватории и в наши дни для проведения как научных, так и прикладных исследований в области изучения особенностей структуры и динамики геомагнитного поля и его связи с другими геофизическими явлениями.

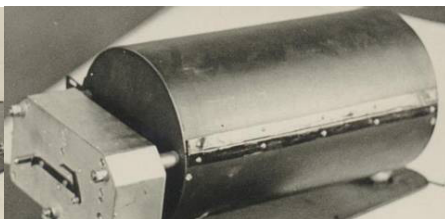


Павильон абсолютных измерений

Павильон, где установлен протонный магнитометр ПМ-1



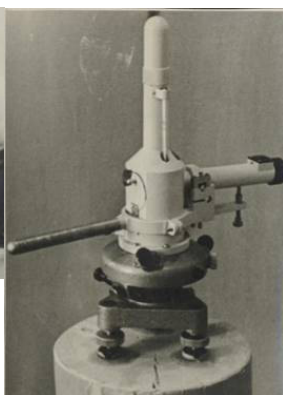
Кварцевые вариометры системы Боброва В.Н. (Т-, Z-, H- и D- компонент)



Барabanный фоторегистратор компонент геоманнитного поля



Протонный магнитометр ПМ-1



Деклинометр

«Рисунок 2 – Внешний вид магнитных павильонов и аппаратура обсерватории «Алма-Ата» на момент создания в 1963 г.

В начальный период (1963–1964 гг.) проводились работы только по регистрации вариаций магнитного поля и их камеральной обработке с последующей передачей информации в Мировой центр данных МЦД-Б2 (г. Москва). В 1965 году впервые начались научные исследования - изучение спокойных геомагнитных суточных вариаций по данным мировой сети магнитных обсерваторий в период Международного геофизического года (1957-1958 гг.), которые проводились Рудневой Н.М. и Жумабаевым Б.Т. [1]. С этого момента проводятся активные исследования по различным направлениям геомагнетизма: изучение тонкой структуры спокойных солнечно-суточных геомагнитных вариаций (Sq); особенности сезонного хода Sq-вариаций в различные часы суток и в зависимости от солнечной активности; характерные особенности Sq-вариаций по данным магнитных обсерваторий Казахстана; изучается связь между поведением Sq токовой системой средних широт и экваториальной электроструей (Погребной В.Н., Жумабаев Б.Т., Казаков В.В.) [2-5].

С 1974 г. по 1980 г. на территории Алматинского геодинамического полигона была развернута сеть пунктов измерений геомагнитного поля, совместно Сек-

тором ионосферы АН КазССР и институтом Сейсмологии АН Каз.ССР, с целью изучения сейсмамагнитных эффектов и разработки методов краткосрочного прогнозирования землетрясений. Работа проводилась Казаковым В.В. и Помазной Л.В. под руководством Зав. Сектором ионосферы Рудиной М.П. [6-7]. Большая работа была проведена в рамках международной программы «Геомагнитный меридиан» [8].

В связи с расширением использования космического пространства в научных и народно-хозяйственных целях стали актуальны наблюдения за воздействиями космических средств на окружающую среду и оценка их опасности для человека. Так в период 2003-2004 гг. Красновым В.М., Николаевским Н.Ф. и Соколовой О.И. проводится работа по изучению изменений геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур [7,8]. Работа доложена на XIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatpry Instruments, Data Acquisition and Processing 9-17 ноября 2004 г. в Японии.

Известно, что геомагнитные возмущения оказывают сильное негативное воздействие на современные технологические системы, вызывая аварийные ситуации на трубопроводах, в электрических сетях, на транспорте и т.п. Поэтому проблема наведенных токов является также актуальной и для Казахстана, обладающего сетью магистральных высоковольтных линий электропередач (220 кВ - 1150 кВ) общей протяженностью около 27 тыс.км. В связи с этим, в 2005-2006 гг. Водяниковым В. В., Гордиенко Г. И., Соколовой О. И. и Яковцом А. Ф. проведена работа по изучению наведенных токов над Казахстаном по данным вариаций магнитного поля Земли [9,10]. Работа была доложена на XIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing 19-24 июня 2006 г. в Польше. В настоящее время, специалистами геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» могут быть обеспечены высокоточные измерения и расчеты параметров геомагнитного поля на территории Казахстана. Так, в 2011-2013 гг., по заказу АО «Казахстан ГИС Центр» Министерства Обороны Республики Казахстан для обновления топографических карт, сотрудниками обсерватории проведены расчеты геомагнитного склонения и его годовых изменений, на что в 2012 г. получен «Акт внедрения научной, научно-технической продукции». Мониторинговые данные обсерватории передаются, по запросам, в различные организации, например, МЧС РК.

Особо следует отметить, что в период строительства магнитных павильонов, юстировки вариометров и организации геомагнитной службы существенный

вклад внес первый ее руководитель Янатханов Ф.Н. – выпускник Каз.ГУ, г. Алматы. Существенный вклад в развитие исследований внесли инженерные решения сотрудников обсерватории: Радостнова, Н., Боброва М., Бурлакова Г. В., а также Качусова О.Л., Коржавая З.Ф., Кокорина Г.И., Нагайцева Г.Н., проводившие измерения и первичную обработку данных для дальнейшего научного анализа.

Интеграция геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» в Международную Сеть Магнитных Обсерваторий INTERMAGNET

До 2003г. обсерватория была оснащена стандартным оборудованием 60-х годов, позволяющим получать среднечасовые значения напряженности магнитного поля Земли с регистрацией на фотобумаге, что требовало ручной оцифровки и не позволяло производить отчеты чаще 3-минутных значений. Погрешность измерений геомагнитного поля была в пределах 5-10 нТл. Морально устаревшее оборудование не позволяло изучать особенности тонкой структуры геомагнитного поля, проводить оперативную диагностику и прогноз. В 2003 г. началась модернизация геомагнитного оборудования на сети базовых магнитных обсерваторий СНГ в соответствии со стандартами Международной Сети Магнитных Обсерваторий INTERMAGNET. Для переоборудования обсерватории «Алма-Ата» был получен международный грант INTAS «The Creation of a Renewed Network of basic Geomagnetic Observatories of NIS countries». Установка нового оборудования (вариационной станции на базе феррозондового магнитометра Lemi-008, однокомпонентного магнитометра для абсолютных измерений Lemi-203, двух протонных магнитометров Pos-1 для измерения модуля индукции магнитного поля Земли) была проведена под руководством В.М. Краснова и Н.Ф. Николаевского и потребовала проведения комплекса подготовительных работ, включающего капитальный ремонт трех павильонов, прокладку подземных коммуникационных каналов между павильонами и между главным магнитным павильоном и зданием Института. Для объединения потоков информации с различных измерительных устройств Н.Ф. Николаевским было разработано программное обеспечение, осуществляющее выборку минутных значений напряженности поля и создание файла согласно требованиям сети INTERMAGNET. В рамках гранта INTAS была проведена 29 апреля – 4 мая 2003 г. метрологическая поверка протонного магнитометра Pos-1 в Российской геомагнитной обсерватории «Арти» г. Екатеринбург совместно с представителем технического секретариата Мировой сети геомагнитных станций INTERMAGNET по первичному эталону. Для того чтобы

войти в международную сеть INTERMAGNET необходимо было предварительно в тестовом режиме в течение года (2004-2005гг) передавать стандартные данные в МЦД сети INTERMAGNET (Эдинбург, Великобритания). Техническим координатором сети INTERMAGNET (J. Rasson) была дана положительная оценка качества обсерваторских данных. 23 ноября 2005 г. был получен Сертификат полноправного членства в INTERMAGNET и качества измерений Геомагнитной обсерватории «Алма-Ата», выданный Техническим секретариатом Международной сети геомагнитных станций INTERMAGNET. На рисунке 3 представлен Сертификат полноправного членства в сети INTERMAGNET.



Рисунок 3 – Сертификат полноправного членства в сети INTERMAGNET геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» от 23 ноября 2005 г.

Оборудование и данные геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» полностью соответствуют техническим требованиям и стандартам, предъявляемым к членам международной сети геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET (IMOs) [11]. Фактически геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» является единственной на территории Средней Азии и Казахстана, данные которой могут использоваться для различных научных исследований. Действующая в настоящее время аппаратура геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» прошла различные метрологические проверки. Так в рамках сети INTERMAGNET: на XI-XII IAGA «Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing» в Японии

(9-17 ноября 2004 г.) и в Польше (19-24 июня 2006 г.). В рамках рекомендаций INTERMAGNET к оборудованию геомагнитных обсерваторий в ноябре 2012 г. проведена метрологическая поверка в «Всероссийском научно-исследовательском институте им. Д.И. Менделеева» (ВНИИМ) г. Санкт-Петербург, на что получены соответствующие «Сертификаты калибровки». На рисунке 4 показаны различные рабочие моменты испытания и поверки геомагнитных приборов.



а

б



в

а) – Иркутск -2003 г. (у прибора Соколова О. И.)

б) – Япония - 2004 г. (с магнитометром Lemi-203

Соколова О.И.)

в) – Санкт-Петербург 2012 г.

Рисунок 4 – Рабочие моменты испытания и поверки приборов геомагнитной обсерватории «Алма-Ата»

С 2010 г. геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» входит в международную сеть станций по нормализации Dst-индекса [12]. Экспериментальные данные обсерватории в режиме реального времени передаются на Dcx index server (University of Oulu, Finland) <http://dxc.oulu.fi>.

В 2005 – 2012 гг. в рамках подготовки и выпуска оптических дисков INTERMAGNET для глобальной сети магнитных обсерваторий «THE GLOBAL NETWORK OF MAGNETIC OBSERVATORIES, DEFINITIVE DATA» О.Л. Качусовой подготовлены данные стандарта INTERMAGNET для обсерватории «Алма-Ата».

В 2009 – 2010 гг. Разработано и внедрено А.Б. Андреевым новое программное обеспечение для обсерватории «Алма-Ата», что позволяет поставлять мониторинговые геомагнитные данные в реальном масштабе времени с наименьшими потерями в МЦД сети INTERMAGNET.

В 2011 – 2012 гг. Г.В. Бурлаковым и А.Б. Андреевым полностью разработан сайт Геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» (рисунок 5) куда поступает вся информация в графическом и цифровом виде с приборов регистрации магнитного поля Земли (<http://geomag.ionos.kz>). В реальном времени представлены минутные данные вариаций трех компонент геомагнитного поля (dxdydz), полного вектора (F) и локального К-индекса геомагнитного поля.

Геомагнитная обсерватория "Алма-Ата"

Департамент «Институт ионосферы» АО НЦ КИТ

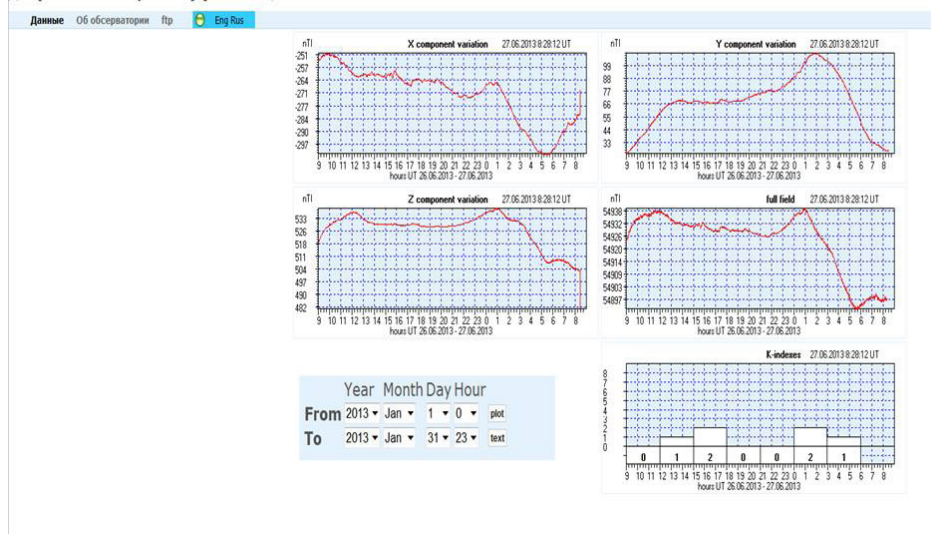


Рисунок 5 – Вид сайта геомагнитной обсерватории «Алма-Ата»

На сегодняшний день база данных геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» включает в себя: а) секундные файлы, полученные с LEMI-008 и POS1 (ноябрь 2003 – июнь 2013 гг.); б) сформированные из них минутные данные вариаций геомагнитного поля (ноябрь 2003 – июнь 2013 гг.). Общая база геомагнитных параметров за весь период существования обсерватории включает данные с

1963 – 2013 гг. Высокое качество данных обсерватории «Алма-Ата» позволяет использовать их для создания различных мировых моделей расчета геомагнитного поля, например, Мировой Модели Геомагнитного Поля WMM 2010 [13-15]. Основным направлением научных исследований, на базе мониторинговых данных обсерватории является изучение морфологических особенностей тонкой структуры геомагнитного поля в Казахском регионе, с целью идентификации генерирующих их источников.

Автор выражает большую благодарность всем кто стоял у истоков исследования геомагнитного поля в Казахстане, всем кто работал и работает в Геомагнитной обсерватории «Алма-Ата».

Работа выполнена по РБК 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать особенности структуры и динамики магнитосферы, ионосферы и вариаций космических лучей с целью диагностики околоземного космического пространства».

Литература

1. Руднева Н.М., Жумабаев Б.Т. Токовые ионосферные системы для некоторых спокойных дней // Геомагнетизм и аэрономия. – 1968. – Т.8. №2. – С.292-295.
2. Погребной В.Н., Жумабаев Б.Т., Гордиенко Г.И. К возможности объяснения особенностей широтных вариаций $S_q(Y)$ и $S_q(Z)$ в экваториальной области с помощью электрического моделирования // Труды Сектора ионосферы АН КазССР. Алма-Ата: Наука. – 1970. – Т.1. – С. 97-102.
3. Погребной В. Н. Сезонный ход $S_q(H)$ -вариаций на средних широтах в различные часы суток. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1972. – Т. 12. № 4. – С. 771-772.
4. Погребной В. Н., Жумабаев Б. Т., Казаков В. В. Особенности сезонного хода S_q -вариаций в различные часы суток по данным магнитных обсерваторий Северного полушария. // Труды сектора ионосферы АН КазССР. – М. – Т.4 – Деп. в ВИНТИ – 1973. № 6461-73.
5. Погребной В. Н., Казаков В. В. О возможной причине резких смещений фокуса S_q -токовой системы. // Геомагнетизм и аэрономия. – 1976. – Т. 16. № 4. – С. 743-744.
6. Ержанов Ж. С., Курскеев А. К., Рудина М. П., Казаков В. В., Насырова З. М., Нысанбаев Т. Е. Методика исследования сейсмомагнитного эффекта на Алма-Атинском полигоне и предварительные результаты. // Изв. АН КазССР. Сер. Геологическая. – 1979. – С. 6.
7. Казаков В. В. Об одной возможности регистрации сейсмомагнитных эффектов. // сб. «Материалы третьей научно-теоретической конференции молодых ученых АН Каз. ССР», Алма-Ата, – 1974. – С.75.

8. *Погребной В. Н., Казаков В. В., Помазная Л. В.* // Международный симпозиум по проекту «Геоманнитный меридиан 145°». Тез. докл. – Л. – 1976. – С. 76.
9. *Соколова О.И., Краснов В.М., Николаевский Н.Ф.* Изменение геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур. // Геомагнетизм и Аэронавигация.–2003.–Т. 43. № 4. –С. 1-5.
10. *Sokolova O.I.* Changes in the Geomagnetic Field under the Effect of Rocket Launches from the Baikonur Spaceport // XIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Proceedings November 9-17, 2004.–P. 235-239.
11. *Vodyannikov V. V., Gordienko, Nechaev S.A., Sokolova O.I., Khomutov S.Yu., and Yakovets A.F.* Induced Currents in Power Lines according to Data on Geomagnetic Variations. // Geomagnetism and Aeronomy.–2006.– Vol. 46, № 6.–P. 809-813.
12. *Vodyannikov V. V., Gordienko, Nechaev S.A., Sokolova O.I., Khomutov S.Yu., and Yakovets A.F.* Study of Geomagnetically Induced Current from Time Derivative of the Earth's Magnetic Field. // XIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Proceedings. 19-24 June 2006. Polish. Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. C-99 (398). – 2007. – PP. 347-352.
13. INTERMAGNET Technical Reference Manual. Ver4.5 Edinburg. UK.– 2011.
14. *Mursula K., Holappa L., and Karinen A.* Correct normalization of the Dst index. // Astrophys. Space Sci. Trans. –4.–2008.–P. 41-45.
15. *Maus S., Macmillan S., McLean S., Hamilton B., Thomson A., Nair M., and Rollins C.* The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015. //NOAA Tech. Report NESDIS/NGDC.– 2010.
16. *Olsen, N., H. Lühr; T. J. Sabaka, M. Manda, M. Rother, L. Toffner-Clausen, and S. Choi* (2006), CHAOS—A model of Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data. //Geophys. J. Int. –166. 67–75. doi:10.1111/j.1365246X.2006.02959.x.
17. *Finlay C. C., Maus S., Beggan C. D., Bondar T. N., Chambodut A., Chernova T. A., Chulliat A., Golovkov V. P., Hamilton B., Hamoudi M., Holme R., Hulot G., Kuang W., Langlais, V. Lesur; F. J. Lowes, H. Lühr; S. Macmillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle B., Michaelis I., Olsen N., Rauberg J., Rother M., Sabaka T. J., Tangborn A., Toffner-Clausen L., Thebault E., Thomson A. W. P., Wardinski I., Wei Z., Zvereva T. I.* International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. // Geophys. J. Int.–2010.–December.–Vol.183.–Issue 3. –P. 1216–1230.

ОСОБЕННОСТИ ФОНОВЫХ ВАРИАЦИЙ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НАКАНУНЕ КАПЧАГАЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2011 ГОДА

Салихов Н.М., Сомсиков В.М., Жумабаев Б.Т.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий» НКА РК
ДТОО «Институт ионосферы»

Изучен и выделен наиболее информативный диапазон в вариациях приземного атмосферного электричества для исследования предвестников Капчагайского землетрясения 2011 года. Установлено, что при активизации литосферных процессов накануне землетрясения произошло увеличение амплитуды колебаний в приземном атмосферном электричестве в интервале периодов от 250-300с до 900-1100с. Отмечена зависимость отклика мощности динамического спектра вариаций атмосферного электричества от магнитуды землетрясения. Всплески амплитуды фоновых колебаний возникли накануне сейсмических событий с магнитудой $M > 3.6$ на расстоянии около 100 км от эпицентра землетрясения примерно за 1 час 31 мин до основного толчка и за 1 час 02 мин до афтершока.

Область применения результатов: сейсмология, солнечно-земная физика.

Ключевые слова: КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ПРИЗЕМНОЕ АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.

Жұмыста 2011 жылы Қапшағай жер сілкінісінің жаршыларын зерттеуі үшін жерге жақын атмосфералық электрдің фон вариацияларындағы ерекшеленген ең информациялық ауқымы зерттелген және ерекшеленген. Жер сілкінісі келесі күннің қарсаңында литосфера процестерінің активизациясы кезінде жерге жақын атмосфералық электрде тербелістер амплитудасының көбеюі 250-300с бастап 900-1100с дейін кезеңдердің аралығында болатыны анықталған. Атмосфералық электрдің вариациялары динамикалық спектрдің қуат күшінің жауап беруі жер сілкіністері магнитудасынан тәуелділігі байқалған. Фон тербелістері амплитудасының шолптары $M > 3.6$ магнитудамен жер сілкінісінің эпицентрнен шамамен 100 км қашықтықта негізгі түрткіге 1 сағат 31 мин дейін және афтершокке 1 сағат 02 мин дейін сейсмикалық оқиғаларының келесі күннің қарсаңында пайда болды.

Нәтижелерді қолдану аумағы: сейсмология, жер-сәулелік физика.

Кілттік сөздер: ҚАПШАҒАЙ ЖЕР СІЛКІНІСІ, ЖЕРГЕ ЖАҚЫН АТМОСФЕРАНЫҢ ЭЛЕКТРЛІГІ, ЖЕР СІЛКІНІСІНІҢ АЛДЫН-АЛА ХАБАРЛАНУЫ.

In this work the most informative range of background variations of the surface atmospheric electricity was studied in details and was chosen for the research of precursors of the Kapchagaysky earthquake 2011. It is established that at activation of lithospheric processes on the eve of the earthquake there was an increase of amplitude of fluctuations in surface atmospheric electricity in the range of the periods from 250-300s to 900-1100s. The dependence of a response of a dynamic spectrum power of atmospheric electricity variations from earthquake magnitude was noted. The surges of amplitude of background fluctuations arose on the eve of seismic events with a magnitude $M > 3.6$ at distance about 100 km from earthquake epicenter approximately 1 hour 31 min earlier prior to the main push and 1 hour 02 min earlier prior to aftershock.

The area of application of the results: seismology, solar-terrestrial physics

Keywords: KAPCHAGAYSKY EARTHQUAKE, SURFACE ATMOSPHERIC ELECTRICITY, PRECURSORS OF EARTHQUAKE

Исследование вариаций приземного атмосферного электричества в сейсмически активных регионах имеет несомненную актуальность. Анализ литературных данных показывает, что в суточных вариациях напряженности электрического поля можно обнаружить аномальные эффекты с опережением землетрясений от нескольких часов до нескольких суток [1-4]. По измерениям параметров приземного электрического поля, регистрируемые перед землетрясениями аномалии разделяют на два основных типа. Аномалии первого типа имеют бухтообразную отрицательную форму на записях вариаций электрического поля, а аномалии второго типа представляют собой некоторый пакет колебаний с набором частот [5]. Динамические характеристики электрического поля рассматриваются как один из основных параметров, участвующих во взаимодействии в системе литосфера - атмосфера в подготовительную фазу землетрясений. Однако экспериментальные исследования в данном направлении немногочисленны и их трактовка неоднозначна. Отправной точкой во многих работах является определение диапазона периодов вариаций атмосферного электричества, наиболее чувствительных к литосферным процессам [3]. В основу данной работы положена рабочая гипотеза, что для целенаправленного поиска возможных предвестников землетрясений необходимо сконцентрировать усилия на изучение и выделение наиболее информативного диапазона в фоновых вариациях электрического поля в приземных слоях атмосферы. Это служит предпосылкой для дальнейшего выявления аномалий, связанных с литосферными процессами Земли. Предполагается, что электрические эффекты литосферных процессов перед землетрясениями соизмеримы с естественными фоновыми колебаниями приземного атмосферного электричества. Важным условием является одновременная регистрация вариаций атмосферного электричества на пространственно разнесенных пунктах, что позволит более надежно идентифицировать отклики от литосферных и атмосферных возмущений. Перспектива исследования связана с разработкой объективных методов прогноза землетрясений для сейсмоопасных районов Республики Казахстан, особенно для такого густонаселенного региона как мегаполис г. Алматы и его окрестностей. Целью исследования является поиск и выделение эффектов литосферной природы во временных и спектральных вариациях приземного атмосферного электричества.

Методика

Измерительные пункты вариаций приземного атмосферного электричества находятся в горах Заилийского Алатау близ г.Алматы на радиополигоне «Орбита» (43° 03' 29,9» СШ 76° 58' 25,0» ВД) на высоте 2750м и Космостанция (43° 02' 33,9» СШ 76° 56' 38,1» ВД,) на высоте 3340 м над ур. моря.

Расстояние между пунктами около 3-х км, перепад высот составляет 590 м. Измерение вариаций приземного атмосферного электричества на радиополигоне «Орбита» проводилось с помощью электрометра, способного регистрировать наведенное электричество от зарядов приземной атмосферы и электромагнитную составляющую, вызванную перемещением зарядов [6]. Датчик электрометра, установленный на Космостанции, по конструкции такой же, как на радиополигоне «Орбита». Электронная схема электрометра на Космостанции имеет отличие, которое заключается в применении для усиления сигнала с датчика, так называемого, «зарядового усилителя».

Этот усилитель обладает высокой чувствительностью и дает возможность переносить электрические заряды с датчика до усилителя по коаксиальному кабелю до 100 м, что позволяет установить датчик в удобном для измерений месте. Схема измерений выглядит следующим образом.

Сигнал с датчика через коаксиальный кабель подается на «зарядовый усилитель» и далее на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа E-154 российской фирмы L-card. Оцифрованный сигнал поступает в компьютер и записывается в соответствующий файл. Синхронизация бортового времени компьютера осуществляется от атомного стандарта частоты и времени через интернет по протоколу ntpdate. Анализ полученных данных был выполнен при событиях, связанных с Капчагайским землетрясением 2011 г. и падением болида над г. Челябинском в 2013 г.

Результаты исследования

Установлено, что в условиях «хорошей погоды» в изменениях приземного атмосферного электричества - $E(t)$ - присутствуют слабые фоновые колебания. При общей схожести записей $E(t)$, зарегистрированных на пунктах радиополигоне «Орбита» и Космостанция, имеются отличительные особенности в вариациях атмосферного электричества (рис.1).

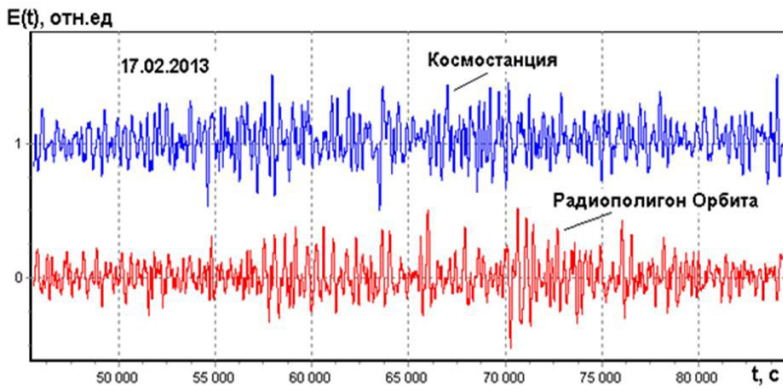


Рисунок 1 - Вариации приземного атмосферного электричества при одновременных измерениях в условиях «хорошей погоды» на измерительных пунктах радиополигона «Орбита» и Космостанции. По оси X указано время от начала суток по времени GMT в секундах.

Для удобства просмотра графики смещены по оси Y.

Обращает внимание присутствие однотипных квазипериодических колебаний в записях приземного атмосферного электричества, как на радиополигоне «Орбита», так и на Космостанции, со значимыми гармониками спектров мощности в интервале периодов от 250-300с до 900-1100с. В тоже время спектральный анализ выявил некоторые различия. Так, на радиополигоне «Орбита» преимущественный спектральный пик имеет частоту $f=1/482$ с Гц, а на Космостанции больший по мощности спектральный пик равен частоте $f=1/324$ с Гц (рисунок 2).

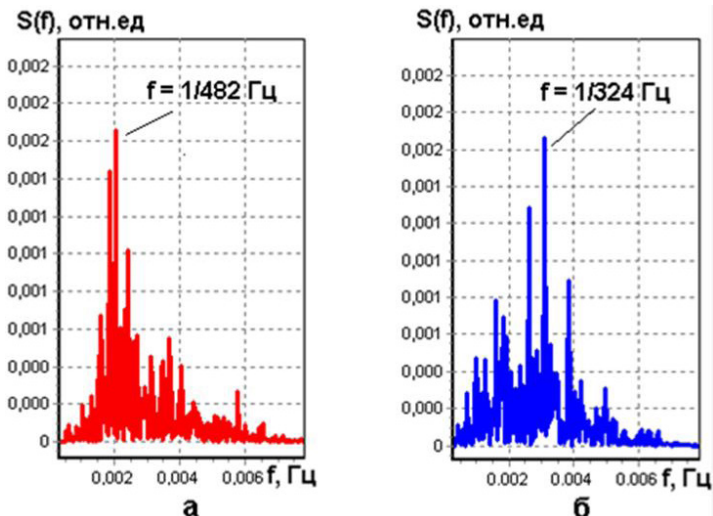


Рисунок 2 - Спектры мощности вариаций приземного атмосферного электричества на радиополигоне «Орбита» (а) и Космостанции (б)

Смещение доминирующего по мощности пика в высокочастотную область и изрезанность спектра мощности на Космостанции обусловлены, по-видимому, большей подвижностью атмосферных зарядов вследствие ветрового перемещения атмосферного воздуха, характерного для горных перевалов. На радиополигоне «Орбита» порывистость ветра значительно слабее и реже. Поэтому одновременная регистрация в разнесенных измерительных пунктах значительно повышает вероятность выявления возможных эффектов, связанных с подготовкой землетрясений или какими-либо другими атмосферными процессами.

Падение болида над г.Челябинск

Достоверность выявления таких событий на разнесенных пунктах была проверена с помощью анализа записей $E(t)$ на Космостанции и радиополигоне «Орбита» в момент падения болида 15 февраля 2013 года над Челябинском. Подчеркнем, что в это время на измерительных пунктах была «хорошая погода». Одновременно с наблюдениями за атмосферным электричеством проводились и инфразвуковые измерения. Отклик на падение болида и его взрыв был нами зарегистрирован на трех пространственно разнесенных инфразвуковых комплексах ДТОО Института ионосферы АО «НЦКИТ». После взрыва болида инфразвуковой сигнал, преодолев расстояние примерно в 1754 км, пришел в пункты регистрации через 1 час 28 минут. Точное время взрыва болида установить не удалось. В связи с этим интересно было определить - был ли отклик от падения болида в записях вариаций электрического поля. Сведения, полученные из Интернета, противоречивы и по данным очевидцев время взрыва болида варьировало от 3 часов 18 мин до 3 часов 28 мин по времени GMT. Поэтому при анализе данных вариаций атмосферного электричества мы взяли допуск с 10-ти минутным интервалом, в котором проводили поиск эффектов от взрыва болида. Исходные записи $E(t)$ подвергли фильтрации цифровым фильтром высоких частот (ФВЧ) с частотой среза $f=1/500c$. Результаты обработки данных приведены на рисунке 3. Как видно на рисунке, в 3ч 27 мин 20 сек в вариациях фонового атмосферного электричества как на Космостанции, так и на радиополигоне «Орбита» наблюдалась особенность в виде импульсного всплеска. Импульсный всплеск появился одновременно, а время зарегистрированного эффекта укладывалось в десятиминутный интервал. Учитывая это, можно предположить, что событие носило глобальный характер и, возможно, было связано с электромагнитным импульсом, образовавшимся при взрыве болида. Меньший шум в записях

$E(t)$ на Космостанции обусловлен, по-видимому, применением в оборудовании электрометра «зарядового усилителя», который обладает лучшими параметрами, чем электронные схемы, примененные в электрометре радиополгона «Орбита». Следовательно, одновременная регистрация в разнесенных измерительных пунктах значительно повышает вероятность выявления возмущений в приземном атмосферном электричестве.

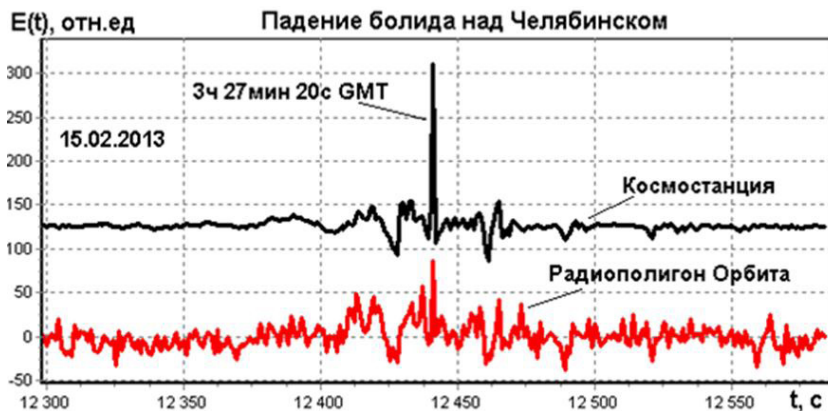


Рисунок 3 – Вариации приземного атмосферного электричества на радиополгоне «Орбита» и Космостанции в условиях «хорошей погоды» при падении болида 15 февраля 2013 года над Челябинском. По оси X указано время от начала суток по времени GMT в секундах.

Для удобства просмотра графики смещены по оси Y.

Капчагайское землетрясение 1 мая 2011г.

Данные, полученные нами по исследованию фоновых вариаций атмосферного электричества, определили возможность выявления и идентификации аномалий, связанных с литосферными процессами Земли. 1 мая 2011года в 2часа 31мин 29с в Капчагайском очаге, в 70 км от г.Алматы произошло землетрясение магнитудой $M=5,4$. На рисунке 4 приведена запись вариаций приземного атмосферного электричества на радиополгоне «Орбита» во время данного события. На графике хорошо прослеживаются два значимых увеличения амплитуды фоновых колебаний. Первое повышение амплитуды произошло примерно за 5500с до основного толчка землетрясения. Второе видимое повышение амплитуды фоновых колебаний произошло за 3700с до афтершока магнитудой $M=4,8$. Зарегистрированные эффекты литосферных процессов, соизмеримы с фоновыми колебаниями приземного атмосферного электричества.



Рисунок 4 – Вариации атмосферного электричества на радиополигоне «Орбита» во время Капчагайского землетрясения и его афтершока, произошедших 1 мая 2011 г. в 02ч 31мин 29с и в 09ч 13 мин 55с. Вертикальными линиями на графике обозначено время землетрясений. По оси X - время от начала суток 30.04.2011 г по времени GMT в секундах. Для удобства просмотра графики смещены по оси Y.

Графики построены фильтрацией скользящим средним исходной записи вариаций электрического поля $E(t)$ по 25 точкам (секунд). Далее с целью наглядной демонстрации увеличения амплитуды фоновых колебаний перед землетрясением был рассчитан динамический спектр мощности. Для расчета спектра мощности было выбрано временное окно равное 400 с, сдвиг окна - 50 с, всего рассчитано около 1100 спектров мощности (рисунок 5).



Рисунок 5 - Динамический спектр мощности вариаций атмосферного электричества во время Капчагайского землетрясения и его афтершока, произошедших 1 мая 2011г. в 02ч 31мин 29с и в 09ч 13мин 55с.

Вертикальными линиями обозначено время землетрясений. По оси X - время от начала суток 30.04.2011 г по времени GMT в секундах.

Накануне основного толчка землетрясения зарегистрировано наибольшее увеличение мощности динамического спектра вариаций атмосферного

электричества. Вслед за основным толчком произошло 5 афтершоков магнитудой от 3,6 до 4,6. Из них лишь накануне второго афтершока ($M=4,6$) в 09ч 13мин 55с наблюдалось значительное повышение мощности динамического спектра и менее выраженное накануне первого афтершока ($M=3,6$ в 03ч 05мин 50с), которое перекрывалось эффектом от основного толчка. Прослеживается зависимость отклика мощности динамического спектра от магнитуды землетрясений (рис.5).

Исследование возмущений в фоновых колебаниях атмосферного электричества на заключительной стадии подготовки землетрясений актуально для оперативного сейсмического прогноза. Анализ данных, полученных за период 2011-2012 гг. показал, что интенсивность колебаний атмосферного электричества и спектральные характеристики сигналов с электрометров в течение суток зависят от метеоусловий и состояния приземной атмосферы. Поэтому выявление особенностей, связанных с литосферными процессами, может быть реализовано только при условии «хорошей погоды». Важным фактором, повышающим надежность идентификации эффектов на заключительной стадии подготовки землетрясений, является регистрация сигналов с электрометров, расположенных на пространственно разнесенных пунктах. Установлено, что в период подготовки землетрясения произошло усиление амплитуды колебаний в приземном атмосферном электричестве в интервале периодов от 250-300с до 900-1100с. По-видимому, указанные периоды фоновых вариаций атмосферного электричества, наиболее чувствительны к литосферным процессам Капчагайского очага. Не исключено, что это характерно не только для Капчагайского землетрясения, но и для других сильных сейсмических событий. К настоящему времени аномальные возмущения приземного атмосферного электричества перед землетрясениями зарегистрированы в различных сейсмоактивных регионах мира. Обычно они возникают за первые десятки часов-первые часы перед событиями с магнитудой $M > 3.5$ на расстоянии до 200-250 км от эпицентра [2,5]. Это вполне согласуется с данными наших работ по Капчагайскому очагу, что подчеркивает надежность сделанных нами выводов и актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Выводы. В работе изучен и выделен наиболее информативный диапазон в фоновых вариациях приземного атмосферного электричества для исследования предвестников Капчагайского землетрясения 2011 года.

Установлено, что при активизации литосферных процессов накануне Капчагайского землетрясения произошло усиление амплитуды колебаний в

приземном атмосферном электричестве в интервале периодов от 250-300с до 900-1100с. Отмечена зависимость отклика мощности динамического спектра вариаций атмосферного электричества от магнитуды землетрясений.

Всплески амплитуды фоновых колебаний возникли до сейсмических событий с магнитудой $M > 3.6$ на расстоянии около 100 км от эпицентра Капчагайского землетрясения примерно за 1 час 31 мин до основного толчка и за 1 час 02 мин до афтершока.

Расчет динамических спектров показал себя как чувствительный метод выявления возмущений в фоновых вариациях приземного атмосферного электричества накануне и во время Капчагайского землетрясения 2011 года.

Подтверждена способность регистрации электромагнитного импульса с помощью пространственно разнесенных электрометров на примере взрыва болида над Челябинском в феврале 2013 г.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать взаимосвязь динамических процессов в атмосфере с процессами естественного и антропогенного происхождения на Земле».

Литература

1. Руленко О. П. Некоторые особенности проявления аномалий электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями// Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский.– 2001.– 428с.
2. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений// М.: Наука.–1992. –192 с.
3. Смирнов С.Э. Динамические характеристики вертикальной компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. с. Паратунка Елизовского р-на, Камчатская обл. –2006.–27с.
4. Маратулеце Ю.В., О. П. Руленко, И. А. Ларионов, М. А. Мищенко. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород// Доклады Академии наук.–2011. –Т. 440, № 3.–С. 403–406.
5. Руленко О. П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. –2000.–№ 4. –С. 57-68.
6. Н.М.Салихов, Я.В.Дробжева, В.М.Краснов, В.Т. Жумабаев, В.М.Сомиков. Проявление сейсмической волны Капчагайского землетрясения в записях инфразвука и электрического поля // Известия НАН РК. – 2011. –№4. – С. 129-135.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО СКЛОНЕНИЯ ПО ДАННЫМ
МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ ЗА 2005–2011ГГ

Соколова О.И., Бурлаков Г.В., Качусова О.Л.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

Исследованы среднегодовые значения геомагнитного склонения D для пространственно разнесенных геомагнитных обсерваторий: «Алма-Ата», «Ключи» и «Иркутск» за период 2005-2011 гг. Результаты показали увеличение значений восточного склонения для обсерватории «Алма-Ата» на 6,3 мин (с $4^{\circ}46.6'$ в 2005 г. до $4^{\circ}52.9'$ в 2011г.), уменьшение значений восточного склонения для обсерватории «Ключи» на 10,3 мин (с $8^{\circ}26.5'$ до $8^{\circ}16.2'$) и увеличение значений западного склонения для обсерватории «Иркутск» на 26,9 мин (с $-2^{\circ}48.7'$ в 2005 г. до $-3^{\circ}15.6'$ в 2011г.).

Область применения результатов: солнечно-земная физика, высокоточная навигация.

Ключевые слова: ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, УГОЛ ГЕОМАГНИТНОГО СКЛОНЕНИЯ

2005-2011жж. жылдар аралығындағы «Алма-Ата», «Ключи» және «Иркутск» геомагниттік обсерваториялық кеністіктік таратылған D геомагниттік жіктеу үшін ортажылдық маңызы зерттелген. «Алма-Ата» обсерваториясы үшін 6,3 мин ($4^{\circ}46.6'$ 2005ж. бастап $4^{\circ}52.9'$ 2011 ж. дейін) шығыс жіктелу мәнінің көбейгені, «Ключи» обсерваториясы үшін 10,3 мин ($8^{\circ}26.5'$ бастап $8^{\circ}16.2'$ дейін) шығыс жіктелу мәнінің азайғанын және «Иркутск» обсерваториясы үшін 26,9 мин ($4^{\circ}46.6'$ 2005ж. бастап $4^{\circ}52.9'$ 2011 ж. дейін) батыс жіктелу мәнінің көбейгенін қорытынды нәтижелері көрсеткен.

Нәтижелерді қолдану аумағы: жер-сәулелік физика, жоғары дәлдікті навигация.

Кілттік сөздер: ГЕОМАГНИТТІК ӨРІС, ГЕОМАГНИТТІК ЖІКТЕЛУ БҰРЫШЫ.

Studied the average annual value of the geomagnetic declination D spaced geomagnetic observatories: “Alma-Ata”, “Kliuchi” and “Irkutsk” for the period 2005-2011. The results showed an increase of values of the eastern declination D at the observatory “Alma-Ata” at 6.3 min ($4^{\circ}46.6'$ in 2005 to $4^{\circ}52.9'$ in 2011), a decrease of values eastern declination D at the observatory “Kliuchi” at 10.3 min ($8^{\circ}26.5'$ to $8^{\circ}16.2'$) and the increase in the of western declination D for the observatory “Irkutsk” at 26.9 min (from $-2^{\circ}48.7'$ in 2005 to $-3^{\circ}15.6'$ in 2011).

The area of application of the results: geomagnetism, solar-terrestrial physics

Keywords: GEOMAGNETIC FIELD, GEOMAGNETIC DECLINATION ANGLE

Для решения задач высокоточной навигации движущегося объекта необходимо знать в каждой точке траектории движения два типа исходных данных: 1) местоположение объекта (текущие координаты); 2) направление движения. Первый тип данных, текущие координаты объекта, обеспечивается с помощью спутниковых навигационных систем. Второй тип данных, направление движения, как правило, определяется на основе измерения азимута относительно положения северного геомагнитного полюса. Координаты геомагнитного полюса не остаются постоянными – дрейфуют со временем, соответственно вносится ошибка в величину азимута. Положение северного магнитного полюса (СМП), согласно модели Олсена CHAOS (A Model of Earth's Magnetic Field derived from CHAMP, подтвержденной наземными исследованиями, приведено в [1]. Прогноз положения СМП на ближайшие несколько лет сделан исходя из предположения, что средняя скорость и направление движения СМП не менялись после 2007 г. Направление на геомагнитный полюс относительно географического в каждой точке Земли определяется величиной склонения геомагнитного поля, и эта величина с высокой точностью измеряется на геомагнитных обсерваториях современными магнитометрами. Многолетние измерения склонения D , которые проводят магнитные обсерватории, показывают, что магнитное склонение меняется во времени. Например, на обсерватории Плещеницы (Беларусь) склонение увеличилось с $D = 5^\circ 02.7'$ до $D = 7^\circ 07.7'$ (1960÷2006 гг.), на обсерватории Бельск (Польша) склонение увеличилось с $D = 2^\circ 04.2'$ до $D = 4^\circ 37.7'$ (1996÷2005 гг.), в Иркутске (Россия) склонение с восточного в 1887 г. $D = +2^\circ 24'$ перейдя через нулевое значение в 1934 г. сместилось в западном направлении и в 2001 г. $D = -2^\circ 24'$ [1, 2]. Соответственно, изменения магнитных склонений учитываются при высокоточной навигации для уменьшения ошибок при определении азимута. Все современные навигационные карты содержат информацию о величине склонения геомагнитного поля. В связи с дрейфом геомагнитного полюса эти карты необходимо обновлять. Кроме того, для высокоточной навигации самолетов, ведущие международные аэропорты регулярно проводят измерения склонения геомагнитного поля.

Магнитные обсерватории выдают информацию о геомагнитном поле, используя данные вариационных станций, датчики которых являются относительными приборами с достаточно узким диапазоном измерений. Абсолютные значения вариаций эпизодически определяются путем проведения абсолютных наблюдений, с помощью которых становятся известны базисные

значения в нТл нулевых напряжений в измерительных каналах цифровых станций [1-3]. Например, в г. Иркутске принятые значения – это интервалы постоянных базисных значений со скачками между этими интервалами. В г.Новосибирске аппроксимируют наблюдаемые данные сглаживающим сплайном (между скачками). В геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» получение «принятых» базисных значений – это аппроксимация исходных данных некоторой функцией, наиболее оптимально отражающей поведение базисных линий. Используется параметрическая аппроксимация, тип функции определен заранее, задача сводится к подбору оптимальных коэффициентов. Базовые значения рассчитываются по следующим формулам: $X=F\cos I\cos D$, $Y=F\cos I\sin D$, $Z=F\sin I$, где X – северная компонента, Y – восточная компонента, Z – вертикальная компонента, F – полная напряженность поля (амплитуда векторного поля), I – наклонение (угол между направлением поля и горизонтальной плоскостью, отсчитываемый по направлению вниз от горизонтали). Расчеты по результатам наблюдений в обсерваториях сводятся также к вычислению средних углов и определению склонения в угловых минутах по формуле:

$$D_i = \text{atan} \left(\frac{Y_i}{X_i} \right),$$

где D – склонение геомагнитного поля (угол между истинным севером и горизонтальной компонентой поля, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке).

Для получения реальных значений склонения D были выбраны три пространственно разнесенные геомагнитные обсерватории члены IMO – геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» [43.25°N; 76.92°E] ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», г. Алматы, РК; геофизическая обсерватория «Ключи» Российской академии наук (РАН), г. Новосибирск, РФ [54.85°N; 83.23°E]; геомагнитная обсерватория «Иркутск» Института Солнечно-земной физики РАН, г. Иркутск, РФ [52.17°N, 104.45°E].

В геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» (IAGA код AAA) проводят наблюдения склонения D феррозондовым деклинометром Lemi-203 на базе теодолита ЗТ2КП. Наблюдения проводятся 2-3 раза в неделю для получения абсолютных значений склонения D . Для получения абсолютных значений геомагнитного поля из вариационных данных нужно к вариациям прибавлять значения базисных уровней вариометров. Из наблюдаемых значений D и вариационных значений

X, Y, Z были вычислены среднемесячные и среднегодовые абсолютные значения склонения D за период 2005-2011 гг. Реальные значения D, полученные по данным геомагнитной обсерватории ААА за период 2005-2011 гг., приведены в таблице 1.

В Новосибирской комплексной магнитно-ионосферной станции (геофизическая обсерватория «Ключи») (IAGA код NVS) наблюдения склонения D проводят феррозондовыми (деклинометрами-инклинометрами) магнитометрами на базе немагнитных теодолитов Theo020B и 3Т2КП. Методика наблюдений склонения D стандартная. Из полученных абсолютных значений и суточных значений геомагнитного поля были рассчитаны среднегодовые абсолютные значения склонения D за период 2005-2011 гг. для обсерватории NVS. Элементы, используемые при расчете среднегодовых значений склонения D для геофизической обсерватории NVS – это X, Y, Z компоненты геомагнитного поля. Реальные значения D, полученные по данным Геофизической обсерватории NVS за период 2005-2011 гг. приведены в таблице 2.

В Геомагнитной обсерватории «Иркутск» (IAGA код IRT) проводят наблюдения склонения D феррозондовыми деклинометрами и деклинометрами/инклинометрами – THEO-010A и Lem1-203. Из суточных минутных файлов и вариаций склонения dD были получены полные вариации склонения D в угловых минутах и среднегодовые значения склонения D за период 2005-2011 гг. для обсерватории IRT. Элементы, используемые при расчете среднегодовых значений склонения D для IRT – это H, D, Z (H-горизонтальная составляющая; D-склонение; Z-вертикальная компонента геомагнитного поля). Реальные значения D, полученные по данным магнитной обсерватории IRT за период 2005-2011 гг. приведены в таблице 3.

Широта: 43.25°N		Долгота: 76.92°E		Высота: 1300 м
Год	D	Град	мин	Элементы
2005		4	46.6	XYZ
2006		4	47.5	XYZ
2007		4	47.8	XYZ
2008		4	49.2	XYZ
2009		4	51.2	XYZ
2010		4	52.6	XYZ
2011		4	52.9	XYZ

Таблица 1 – Среднегодовые значения геомагнитного склонения D, полученные из экспериментальных данных геомагнитной обсерватории

«Алма-Ата»

Широта: 54.85°N		Долгота:83.23°E		Высота: 130 м
Год	Град	мин	Элементы	
2005	8	26.5	XYZ	
2006	8	23.9	XYZ	
2007	8	22.2	XYZ	
2008	8	20.6	XYZ	
2009	8	18.9	XYZ	
2010	8	17.7	XYZ	
2011	8	16.2	XYZ	

Таблица 2 – Среднегодовые значения геомагнитного склонения D, полученные из экспериментальных данных геофизической обсерватории «Ключи» NVS, Россия

Широта: 52.17°N		Долгота:104.45°E		Высота: 460 м
Год	D	град	мин	Элементы
2005	-2	48.7	DNZ	
2006	-2	53.4	DNZ	
2007	-2	57.5	DNZ	
2008	-3	02.0	DNZ	
2009	-3	06.6	DNZ	
2010	-3	11.4	DNZ	
2011	-3	15.6	DNZ	

Таблица 3 – Среднегодовые значения геомагнитного склонения D, полученные из экспериментальных данных геомагнитной обсерватории «Иркутск» IRT, Россия

Таким образом, в результате расчетов получены реальные значения геомагнитного склонения D для пространственно разнесенных геомагнитных обсерваторий «Алма-Ата», «Ключи», «Иркутск» за период 2005-2011 гг. Отметим, что для NVS и AAA полученные значения склонений D положительные, а для IRT значения склонений D отрицательные. Это говорит о том, что для г. Алматы значения склонения D смещаются в восточном направлении, а для г. Новосибирска и г. Иркутска склонения D смещаются в западном направлении. Результаты расчетов склонений, по наблюдаемым обсерваторским данным, показывают изменения значений D по годам, так для AAA и произошло увеличение восточного склонения, для NVS – уменьшение восточного склонения, а для IRT увеличение значений западного склонения. Экспериментально рассчитанные значения склонения D показывают, что геомагнитное склонение наиболее сильно меняется в пространстве. Так, значения склонения D для разных координат могут отличаться в 1.5-2 раза относительно друг друга. Например, для координат

обсерватории «Алма-Ата» $D = 4^{\circ}46.6'$, а для координат обсерватории «Ключи» $D = 8^{\circ}26.5'$. Геомагнитное склонение D также изменяется и во времени. Анализ данных, полученных по обсерваторским наблюдениям, показал, что за последние семь лет величина восточного геомагнитного склонения для геомагнитной обсерватории ААА увеличились на 6.3 мин (с $4^{\circ}46.6'$ в 2005 году до $4^{\circ}52.9'$ в 2011 году); для NVS, за этот же период, величина восточного склонения уменьшились на 10.3 мин (с $8^{\circ}26.5'$ до $8^{\circ}16.2'$); для геомагнитной обсерватории IRT значения западного склонения увеличились на 26.9 мин (с $-2^{\circ}48.7'$ в 2005 году до $-3^{\circ}15.6'$ в 2011 году).

Работа выполнена по РБК 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать особенности структуры и динамики магнитосферы, ионосферы и вариаций космических лучей с целью диагностики околоземного космического пространства».

Литература

1. *Olsen, N., H. Lühr, T. J. Sabaka, M. Manda, M. Rother, L. Tøffner-Clausen, and S. Choi* (2006), CHAOS—A model of Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data. // *Geophys. J. Int.* –166. 67–75. doi:10.1111/j.1365246X.2006.02959.x.
2. *Каратаев Г.И., Карагодина О.И.* Пространственно-временная характеристика магнитного склонения на территории Беларуси и практические аспекты его мониторинга. // *ЛИТАСФЕРА.* –2008. Т.–2.–С. 127-135.
3. *Jankowski J., Sucksdoff C.* Guide for magnetic measurements and observatory practice. //Published by IAGA. Warszawa. Poland. –1996.–С. 86-118.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Тойшиев Н.С.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «Институт ионосферы»

В работе исследованы переходные процессы при прямом пуске асинхронного двигателя, определены его предельные механические характеристики и область применения.

Область применения результатов: электроэнергетика.

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Тармақта қозғалтқышты тікелей іске қосудағы өтпелі процестерді зерттеу келтірілген, оныңның шекті механикалық сипаттамалары және қолдану облысы анықталды.

Нәтижелерді қолдану аумағы: электроэнергетика.

Өзекті сөздер: АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ, САНДЫҚ ҮЛГІЛЕУ, ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ӨРІС, ӨТПЕЛІ ПРОЦЕСТЕР.

This paper contains a study of transients in direct motor start, defined limits of its mechanical characteristics and application.

The area of results applications: electric power

Key words: ASYNCHRONOUS MOTORS, NUMERICAL SIMULATION, ELECTROMAGNETIC FIELD, TRANSIENTS

Введение

При пуске двигателя по возможности должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен осуществляться без сложных пусковых устройств; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи - по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели: необходимость плавного пуска, максимального пускового момента. Для улучшения пусковых характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, а именно, увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока, на роторе применяют специальную форму паза. При этом внешняя от оси вращения часть паза ротора имеет меньшее сечение чем внутренняя. Это позволяет использовать эффект вытеснения тока, за счет которого увеличивается активное сопротивление обмотки ротора при больших скольжениях. Так же с двойной беличьей клеткой короткозамкнутым ротором.

Асинхронный двигатель — это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

Достоинства:

- 1) лёгкость в изготовлении;
- 2) отсутствие электрического контакта ротора со статической частью

машины.

Недостатки:

- 1) небольшой пусковой момент;
- 2) значительный пусковой ток.

Пуск двигателей – это процесс перехода двигателя и производственного механизма из неподвижного состояния в состояние вращения с номинальной скоростью. Если при пуске вращающий момент двигателя больше момента сопротивления, то угловая скорость агрегата увеличивается и происходит разгон двигателя до тех пор, пока не наступит равновесие между электромагнитным моментом двигателя и моментом сопротивления производственного механизма, наступит установившийся режим. При пуске, реверсе или торможении асинхронного двигателя в обмотках статора и ротора возникают электромагнитные переходные процессы, которые протекают одновременно с механическими переходными процессами. Токи, протекающие по обмоткам асинхронного двигателя в течение электромагнитных переходных процессов,

можно разложить на свободные и вынужденные составляющие. Свободные составляющие токов ко времени окончания электромагнитного переходного процесса практически затухают до нуля. В результате влияния свободных токов, а также изменения скорости вращения ротора электромагнитный момент двигателя в течение переходного процесса может быть как больше, так и меньше момента, определяемого статической механической характеристикой. Это обуславливает колебательный характер изменения электромагнитного момента асинхронного двигателя во времени со значительными амплитудами на начальном участке переходного процесса. Следовательно, зависимость электромагнитного момента от скорости вращения ротора или от времени, определенная в динамике, отличается от аналогичной зависимости, построенной в статике.

В настоящее время практически все электроприводы представляют собой нерегулируемые приводы с асинхронными двигателями. Они нашли широкое применение в теплоснабжении, водоснабжении, системах кондиционирования и вентиляции, компрессорных установках и других сферах. Благодаря плавному регулированию скорости вращения, в большинстве случаев можно отказаться от дросселей, вариаторов, редукторов и прочих регулирующих устройств, что существенно упрощает механическую систему, уменьшает расходы на ее эксплуатацию и повышает надежность. Моделирование асинхронного двигателя будем производить по абсолютным значениям переменных – токов, моментов, мощностей. Имитационное моделирование динамических процессов в асинхронном двигателе произведем в соответствии со структурной схемой в программной среде Simulink [1]. Номинальное значение угловой частоты напряжения обмотки статора

Полная схема имитационных моделей короткозамкнутого асинхронного двигателя, составленная в соответствии со структурной схемой, во- вращающейся системы координат приведена на рисунке 1 [2].

Так как динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя можно получить только по результатам расчетов переходных процессов, то вначале приведем графики переходных процессов скорости, момента и тока статора (рисунки 2 и 3 соответственно) при пуске двигателя прямым включением в сеть [3].

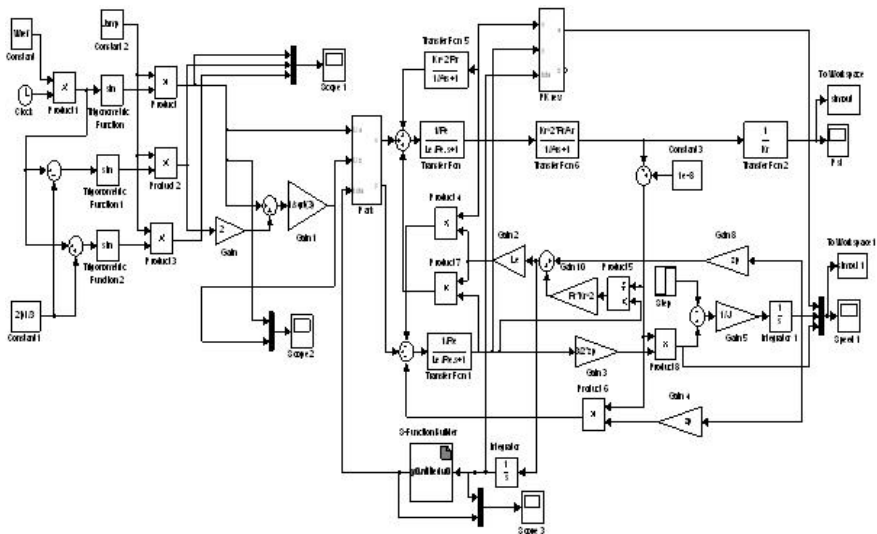


Рисунок 1 – Схема имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, во вращающейся системе координат.

Протокол вводимых параметров двигателя:

$f=50;$	$L_r=L_r_+L_m;$
$R_s=0.012;$	$z_p=p/2;$
$R_r=0.013;$	$K_r=L_m/L_r;$
$L_{s_}=0.0001947;$	$R_e=R_s+R_r*K_r^2;$
$L_{r_}=0.0002637;$	$L_e=L_s-L_m^2/L_r;$
$L_m=0.0095681;$	$U_{amp}=220*\sqrt{2};$
$p=4;$	$A_r=R_r/L_r;$
$J=3.2;$	$W_{ref}=2*\pi*f;$
$L_s=L_{s_}+L_m;$	$h=0.00001.$

Для исследования динамики асинхронного двигателя при прямом пуске произведем пуск двигателя вхолостую, а затем в момент времени $t=1$ с осуществим наброс номинальной нагрузки .

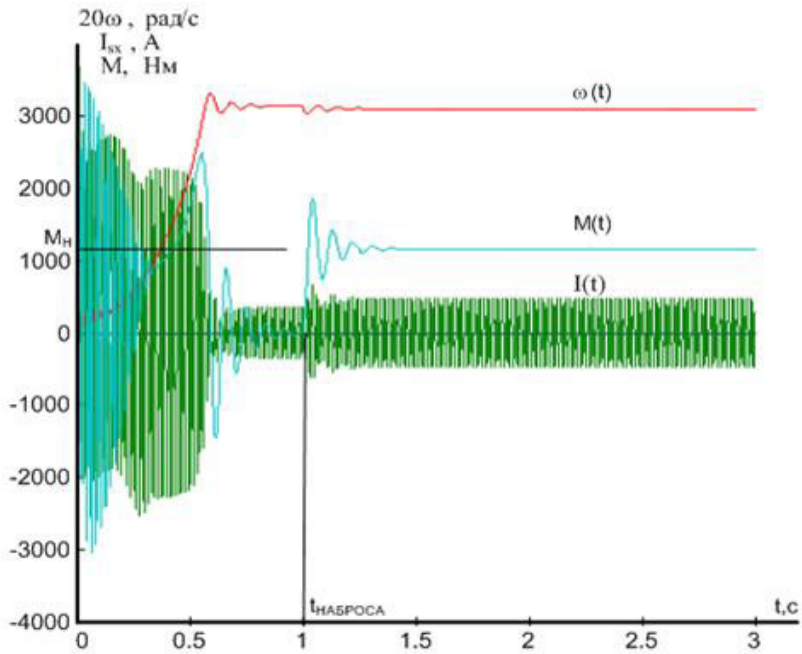


Рисунок 2 - Переходные процессы скорости, момента, и тока статора при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя ДТА-1У1 прямым включением в сеть и последующем набросе нагрузки

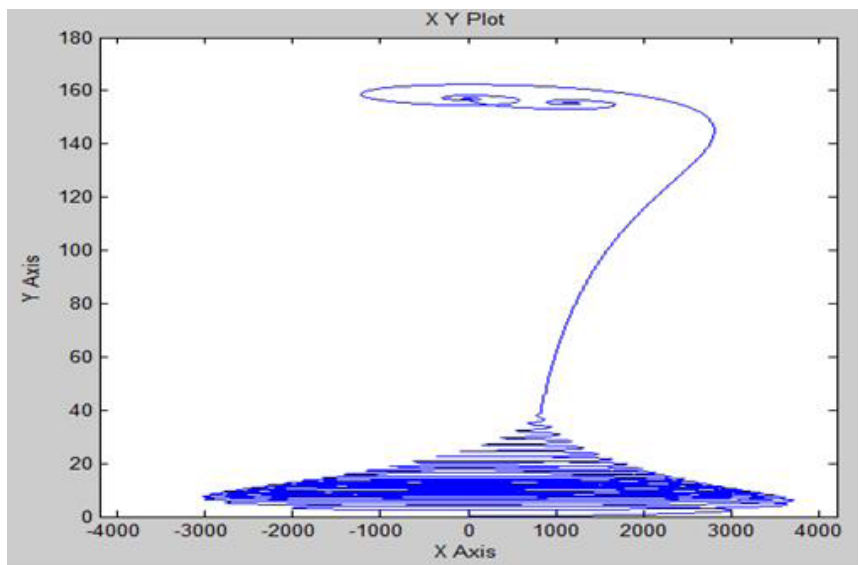


Рисунок 3 – Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя ДТА-1У1 прямым включением в сеть и последующем набросе нагрузки

S-функция блока untitled (ограничение интегрирования угла на уровне) – серый блок на модели рисунка 4.

```
static float in1; in1=u0[0]; while (in1>=6.28) in1=in1-6.28; while (in1<0)
in1=in1+6.28; y0[0]=in1;
```

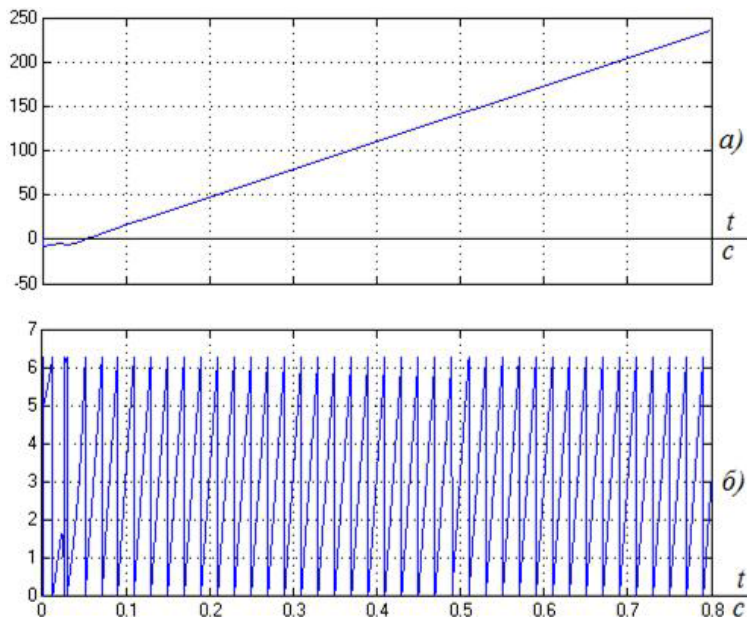


Рисунок 4 - Переходные процессы угла : а) до ограничения интегрирования; б) после ограничения интегрирования на уровне

Вид переходных процессов при прямом пуске асинхронного двигателя показывает наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента, которая изменяется в пределах от -3000 до $+3800$ Н·м и затухает по мере разгона двигателя. Переходные процессы доказывают, что двигатель является устойчивым динамическим звеном.

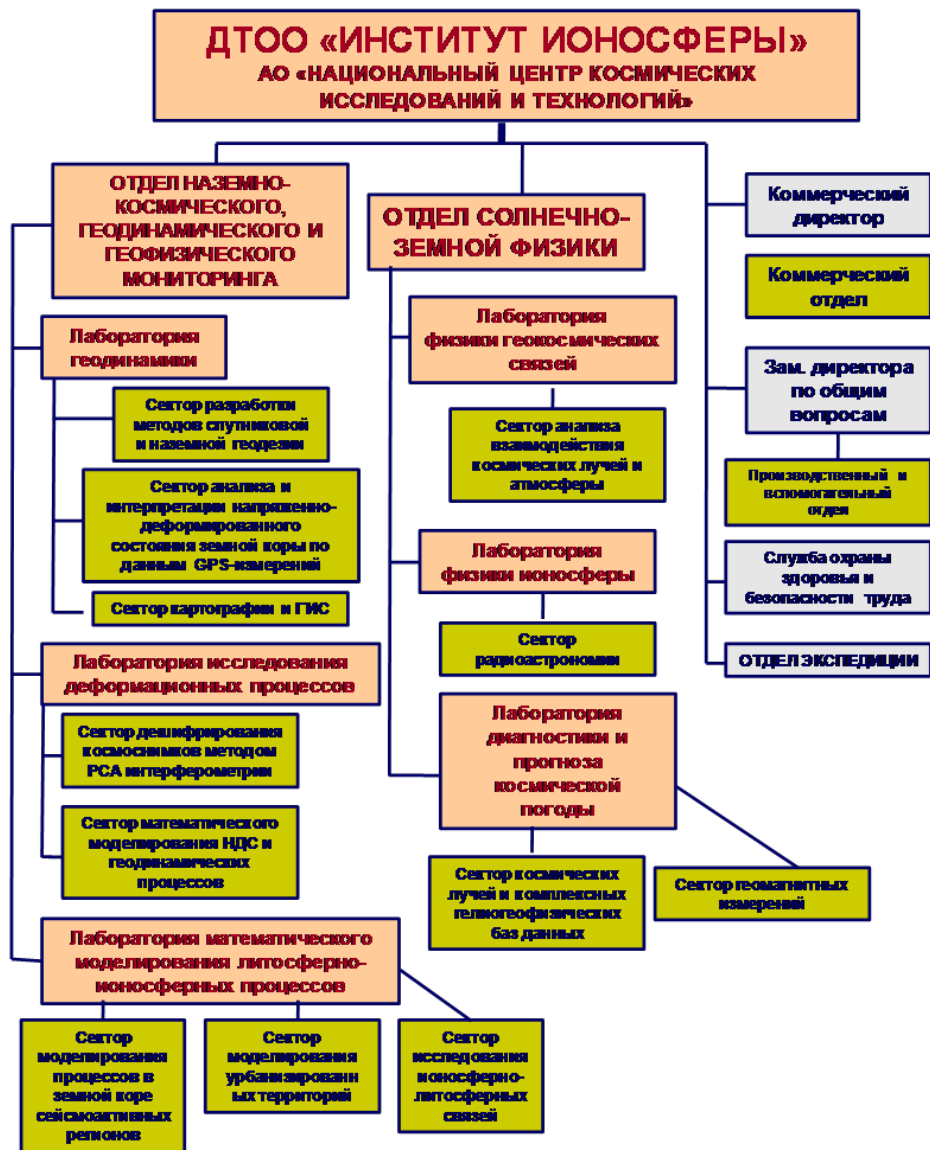
Выводы

По результатам статических и динамических характеристик можно считать, что параметры схемы замещения асинхронного двигателя выбраны верно. На основании исследования были построены предельные механические характеристики электропривода, которые определили область работы и допустимые значения переменных электропривода. Для проверки было произведено моделирование, которое подтвердило правильность расчетов.

Литература

1. Черных И. В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink – СПб.; М.: Питер: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
3. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Расчет характеристик электроприводов переменного тока, Часть 1 – Асинхронный двигатель, Томск, 2005 г. – 136 с.

СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИНСТИТУТА



В структуру Дочернего товарищества с ограниченной ответственностью «Институт ионосферы» Акционерного общества «Национальный центр космических исследований и технологий» входят: Административно-управленческий персонал (АУП), отдел наземно-космического, геодинимического

и геофизического мониторинга, отдел солнечно-земной физики, отдел экспедиции, коммерческий отдел, производственный и вспомогательный отдел, служба охраны здоровья и безопасности труда, ПРИСМ (представитель руководства по интегрированной системе менеджмента).

Отдел наземно-космического, геодинамического и геофизического мониторинга, в составе отдела три лаборатории:

1) Лаборатория геодинамики

Направления исследований: наземно-космический мониторинг геодинамических процессов на территории РК.

В составе лаборатории геодинамики три сектора:

- Сектор разработки методов спутниковой и наземной геодезии

Назначение сектора: разработка наземно-космических методов мониторинга геодинамических процессов.

- Сектор анализа и интерпретации напряженно-деформированного состояния земной коры по данным GPS-измерений

Назначение сектора: анализ и интерпретация результатов геодинамического мониторинга.

- Сектор картографии и ГИС

Назначение сектора: картографическое и геоинформационное обеспечение геодинамических исследований

2) Лаборатория исследования деформационных процессов

Направления исследований: геодинамические процессы и явления в земной коре, обусловленные естественными и антропогенными воздействиями.

В составе лаборатории исследования деформационных процессов два сектора:

- Сектор дешифрирования космоснимков методом РСА интерферометрии

Назначение сектора: мониторинг и прогнозирование развития геодинамических процессов в земной коре.

- Сектор математического моделирования НДС и геодинамических процессов

Назначение сектора: создание математических геомеханических моделей и оценка НДС земной коры в районах экологического риска.

3) Лаборатория математического моделирования литосферно-ионосферных процессов

Направления исследований: математическое и компьютерное моделирование стационарных и нестационарных процессов в литосфере и исследование

возможных связей геодинамических процессов в периоды активизации с явлениями в ионосфере. В составе лаборатории математического моделирования литосферно-ионосферных процессов три сектора:

- Сектор моделирования процессов в земной коре сейсмоактивных регионов

Назначение сектора: математическое и компьютерное моделирование нестационарных процессов в очаговых зонах и зонах тектонических разломов.

- Сектор моделирования урбанизированных территорий

Назначение сектора: Разработка математических моделей и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры территорий промышленных агломераций и городов с высотной застройкой с использованием данных наземно-космического мониторинга

- Сектор исследования ионосферно-литосферных связей

Назначение сектора: разработка математических моделей и исследование возможных литосферно-ионосферных связей в периоды активизации геодинамических явлений.

Отдел солнечно-земной физики, в составе отдела солнечно-земной физики входят три лаборатории.

1) Лаборатория физики ионосферы

Направления исследований: солнечно-земные связи, изучение роли солнечных вспышек и магнитосферных процессов в генерации ионосферных возмущений радиоизлучение Солнца, идентификация источников различных типов возмущений и создание модели волновых ионосферных возмущений, применение методов симметрии в физике, кинетическая теория, турбулентность, электродинамика ионосферной плазмы, разработка методов прогноза условий распространения коротких радиоволн над Казахстанским регионом.

В состав лаборатории физики и моделирования ионосферы входит сектор «Радиоастрономии».

Назначение сектора «Радиоастрономии» – регистрация и исследование радиоизлучения Солнца, проведение непрерывного мониторинг потока радиоизлучения Солнца на частотах 1,08 ГГц и 2,8 ГГц.

2) Лаборатория физики геокосмических связей

Направления исследований: физика геокосмических связей, изучение вариаций космических факторов и их проявлений в динамических процессах и процессах формирования неравновесных структур в атмосфере, изучение вариаций эмиссии ночного неба, морфологии атмосферных неоднородностей

в районе мезопаузы и исследование взаимосвязи процессов в области нижняя атмосфера/мезосфера/ионосфера, создание теории открытой неравновесной атмосферы, учитывающей влияние поглощаемого потока солнечной радиации на протекающие в ней динамические процессы. В состав лаборатории физики геокосмических связей входит сектор «Анализа нестационарных процессов в атмосфере». Назначение сектора – проведение научно-исследовательских работ в области анализа нестационарных процессов в грозовой атмосфере, проведение экспериментальных работ по исследованию электрических процессов, обусловленных грозовой активностью в атмосфере.

3) Лаборатория диагностики и прогноза космической погоды

Направления работ: исследования физики космических лучей, солнечно-земной физики и геомагнитного поля, прикладные исследования в области диагностики и прогноза геофизической обстановки, космической погоды и геомагнитного поля, мониторинг возмущенности околоземного космического пространства; разработка методики прогноза геофизической обстановки и его оперативное представление заинтересованным организациям. В составе лаборатории диагностики и прогноза геофизической обстановки функционирует два сектора:

- Сектор геомагнитных измерений

Назначение сектора: непрерывные автоматизированные наблюдения (в рамках стандарта мировой сети INTERMAGNET) за поведением геомагнитного поля и ежедневная передача данных в Международный центр данных, находящийся в Эдинбурге (Великобритания).

- Сектор космических лучей и комплексных гелиогеофизических баз данных

Назначение сектора: организация и проведение непрерывных измерений интенсивности потока космических лучей на экспериментальной базе «Космостанция», а также создание и поддержка комплексной базы данных геогелиофизических обсерваторий ДТОО «Институт ионосферы» и представление оперативной и архивной экспериментальной информации на сайте института

ЯРКИЕ СОБЫТИЯ В ЖИЗНИ ИНСТИТУТА

Научно-организационные мероприятия:



Участники 19-ой сессии Азиатско-Тихоокеанского Регионального Форума Космических Агентств. В центре: Председатель НКА РК Мусабаев Т., слева – директор ДТОО «Институт ионосферы» Курманов Б., справа –руководитель отдела НКГТМ Бибосинов А.



Доклад директора ДТОО «ИИ» Курманова Б. на Международном экономическом форуме «Каспийский диалог-2012»



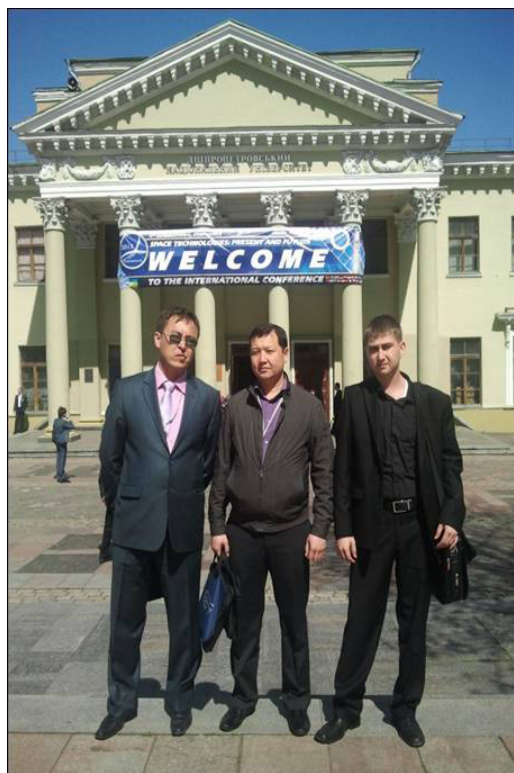
Делегация Казкосмоса на праздновании Дня независимости Республики Казахстан в Посольстве Малайзии.
По центру – Т. Мусабаяев (Председатель НКА РК), первый слева – Курманов Б. первый справа - Бибосинов А.



Награждение участников XVII Международного научного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию со дня рождения академика М.А. Усова - основателей Сибирской горно-геологической школы г. Томск, Россия, апрель 2013 г), третья слева – Турабекова Д. (отдел НКГТМ)



Шигаев Д. (отдел НКГТМ) на научно практической конференции «Наука и образование – стране» (Алматы, 2011г.)



Участники Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 17-19 апреля 2013 года, г Днепрпетровск, Украина.
Первый слева: Асанкулов Н. (отдел НКГТМ)



Учебно-полевая практика по геологии (г. Туссон, штат Аризона, США, 2013г). В центре – Серикбаева Э. (отдел НКГТМ)



Практика в шахте г. Вроцлав (Польша), KGHM CUPRUM 2013г. Слева вторая – Кайранбаева А. (отдел НКГТМ)



Радиополigon «Орбита», сотрудники отдела СЗФ - слева направо: Аушев В., Антонова В., Яковец А., Левин Ю.
справа на фотографии – Бобров М. – проверка аппаратуры.



Тянь-Шаньская Высокогорная Научная Станция. Подъем детекторов для установки «Гроза». По центру – Крюков С. (отдел СЗФ).



Шарипова Г. (отдел СЗФ) – стажировка в ИЗМИРАНе (г. Троицк, Россия) в 2012г. Оборудование - нейтронный монитор.



Доклад Антоновой В. (отдел СЗФ) на международной конференции



Сотрудники Института Мухашева С., Нуралеева К., Алгонова В., Крайнова О., Хачикян Г., Катунцева В., Бейсәмбала Е., Краснов В., Соколова О., Соменко В., Гордиенко Г., Литвинова Т.



Тренинг-курсы по космической погоде (г. Афины, Греция, 2009г).
На верхней фотографии Нигметчанова Г., Цепакина И. (второй ряд вторая слева), на нижней - Майлибаев А. (первый слева)



а



б



в



г

Сотрудники отдела СЗФ на Генеральной Ассамблее Европейского Геофизического Союза (г.Вена, Австрия, апрель 2013г)
 (а) Яковец А. и Антонова В.; (б) – доклад Жумабаева Б.; (в) – доклад - Антоновой В.; (г) – доклад Яковца А.;
 в кресле Ян Ластовичка – профессор Института атмосферной физики, г. Прага (Чехия)



Регистрация участников 31-ой Международной конференции по космическим лучам
(г. Турку, Финляндия, 2010 г.) Третий справа – Майлибаев А. (отдел СЗФ)



31-ая Международная конференция по космическим лучам (г. Турку, Финляндия, 2010 г.).
В центре Крякунова О. (отдел СЗФ) в беседе с зарубежными коллегами



Доклад на международной конференции
справа – Крюков С. (отдел СЗФ)



Доклад Тулубековой Д. (отдел НКГТМ) на XVII Международном научном симпозиуме в секции – Космогеологические исследования.
Методы. Результаты. Перспективы (г. Томск, Россия, 2013 г).

На досуге:



Баскетбольная команда отдела НКГТМ на спартакиаде АО «НЦКИТ», апрель 2013г



Экскурсия в Сибирский ботанический сад (г. Томск, Россия, 2013) Туребекова Д. (отдел НКГТМ)



На экскурсии во время 32 Международной конференции по космическим лучам (г.Пекин, Китай, 2011г). В центре Крякунова О. и Майлибаев А. (отдел СЗФ)



У Великой Китайской стены во время 32-ой международной конференции по космическим лучам (г.Пекин, Китай, 2011г). Слева - Антонова В. (отдел СЗФ)



Коллективный чай в отделе НКГТМ в День Защитника Отечества, 2013г.



Прекрасной половине отдела НКГТМ от его сильной половины в День 8 Марта 2013 года



Председатель Профсоюзного Комитета Акетаев Ж. вводит коллектив Института в Новый 2014 год!

К 60-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ



Ким Александр Сергеевич,

доктор физико-математических наук
заведующий Лабораторией
математического моделирования
литосферно-ионосферных процессов
ДТОО «Институт ионосферы»

Ким Александр Сергеевич родился 20 января 1953 года в Кызыл-Ординской области в семье школьного учителя. В школьные годы проявились способности в математике, физике, музыке. Был участником и победителем олимпиад по математике и физике, выступал за сборную Кызыл-Ординской области по шахматам, являлся лауреатом Республиканского конкурса юных музыкантов и имел приглашение продолжить обучение в Алма-Ате в музыкальной школе имени К. Байсеитовой для одаренных детей по классу скрипки.

В 1970 году стал победителем областной олимпиады и участником Всесоюзной олимпиады школьников по физике, в том же году поступил на механико-математический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Принимал участие в камерном оркестре МГУ в роли 1-ой скрипки. В составе оркестра выступал в Москве и выезжал с гастролями по стране.

В 1975 году по окончании МГУ был распределен в Институт математики и механики Академии наук Казахской ССР (г. Алма-Ата). В 1981 году блестяще защитил кандидатскую диссертацию на тему: «О нестационарных процессах в предварительно напряженной среде при разрыве сплошности» по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 2007 году успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Механика нестационарных процессов в зоне тектонического разлома» по специальности 01.02.07 – механика сыпучих тел, грунтов и горных пород» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Ким А.С. участник многих международных научных конференций по механике и геофизике, автор и соавтор 70 публикаций. Основные работы:

1 Ким А.С. О мгновенном разрыве сплошности среды в условиях антиплоской деформации // Известия АН КазССР, серия физико-математическая, 1979, № 5. -С.76-79.

2 Ержанов Ж.С., Ким А.С. О механизме нестационарных процессов в очаге землетрясения // Сборник «Прогноз землетрясений». - Душанбе-Алма-Ата, 1982, №2. -С.79-93.

3 Kim A.S. Evolution of the stress-strain state in the tectonic fracture zone of the damping section // Материалы международной научно-практической конференции «Вклад корейцев в науку и технику Казахстана». - Алматы, 1997. -С.262-265.

4 Ким А.С. Асейсмическое скольжение вдоль разлома в породном массиве перед разрушением // Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 2003г. - Новосибирск, 2004. - С.141-144.

5 Ким А.С. Медленные движения земной коры и концентрация напряжений в зоне вязкоупругого разлома // Доклады НАН РК, 2006, № 2. -С. 73- 76.

6 Айталиев Ш.М., Баймухаметов А.А., Ким А.С. Об эволюции напряжений на границе литосферных плит в условиях поперечного сдвига // Доклады НАН РК, 2007, № 3. -С. 35-38.

7 Ким А.С. Эволюция напряженно-деформированного состояния земной коры в зоне вертикального разлома // Вестник НАН РК, 2007, №3 . -С. 52-55.

8 Жантаев Ж.Ш., Ким А.С. О синхронности асейсмических движений и вариаций магнитного поля // Материалы 7-го Казахстанско-Китайского симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии». – РК, г. Алматы. 2010. - С. 258-262.

9 Ким А.С. Асейсмические движения в зоне тектонического разлома и вариации магнитного поля // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №4, ч.2, 2011. -С. 457-458.

Основные научные результаты:

Исследована механика нестационарных процессов в земной коре при внезапном образовании магистрального разрыва.

Построена механико-математическая модель асейсмической зоны в земной коре, исследованы медленные движения и концентрация напряжений в зоне тектонического разлома.

Изучено влияние асейсмических движений в земной коре, предшествующих разрушению, на вариации главного магнитного поля.

В разные годы принимал активное участие в научно-организационной деятельности: был председателем Совета молодых ученых и членом ученого совета Института сейсмологии АН КазССР, ученым секретарем докторского совета, в настоящее время является членом научно- технического совета АО «НЦКИТ». В разные годы награждался Почетной грамотой Президиума АН СССР, Премией и Почетной грамотой Алма-Атинского обкома комсомола, Почетной грамотой АО «НЦКИТ».

В настоящее время работает в ДТОО «Институт ионосферы» АО «Национальный центр космических исследований и технологий» в должности заведующего лабораторией математического моделирования литосферно - ионосферных процессов.

Коллектив Института горячо поздравляет доктора физико-математических наук Кима Александра Сергеевича с Юбилейной датой, желает крепкого здоровья и новых научных свершений!



В 2013 году 17 июля исполнилось 100 лет со дня рождения Рудиной Марии Петровны (1813-2001г.г.) – первого и бессменного руководителя Сектора Ионосферы АН Каз ССР, существовавшего с 1961 по 1983гг и успешно переросшего 30 лет назад в Институт ионосферы.

Рудина М.П. работала в Академии наук Казахской ССР с марта 1961, будучи избранной по конкурсу на руководство Сектором ионосферы, организованным при Президиуме АН в связи с выполнением Постановлений СМ СССР и СМ КазССР об участии АН КазССР в исследованиях околоземного космического пространства наземными радиофизическими методами по Международной программе

«Международный Год Спокойного Солнца» (МГСС, 1964-1965гг.) и, в связи с этим, о строительстве на территории Казахстана трех комплексных магнито-ионосферных станций: Алма-Атинской, Карагандинской и Ново-Казалинской.

В 60-ые годы 20 века Мария Петровна проводила организационные работы по строительству трех КМИС и жилых зданий для сотрудников, по оснащению станций оборудованием, по подбору и обучению персонала станций, и уже к октябрю 1963 г., к началу выполнения международной Программы МГСС, обеспечила проведение на трех станциях непрерывных измерений параметров ионосферы и магнитного поля Земли, их обработку и поставку в Мировой Центр Данных (МЦД-Б2, г. Москва) для обмена с международным научным сообществом.

Благодаря целеустремленности и организаторским способностям Марии Петровны, уже в 1964 году в Секторе ионосферы сформировался научный коллектив, способный вести исследования в области солнечно-земной физики. К этому времени по ее инициативе и непосредственном участии, на Алма-Атинской КМИС был создан новый комплекс измерительных радиотехнических установок, значительно расширивший экспериментальные возможности изучения ионосферных процессов и условий распространения радиоволн. Это были установки для измерения ветра и дрейфа ионизации, для измерения коэффициента поглощения радиоволн тремя различными методами, для определения величины атмосферных помех, для оценки напряженности поля передающих радиостанций, для расчета истинных характеристик по ионограммам с использованием

автоматизации и вычислительной техники.

В 1965г, по инициативе Межведомственного Геофизического Комитета и Проблемного Совета по распространению радиоволн при Президиуме АН СССР, в Алма-Ате на базе Сектора ионосферы было проведено Всесоюзное совещание по итогам исследований ионосферы во время МГСС, где работы сотрудников Сектора ионосферы получили высокую научную оценку.

В 1965/1966 гг. Мария Петровна провела большую организационную работу по созданию вблизи Алматы на высоте 3340 м над уровнем моря уникального аппаратного комплекса по измерению радиоизлучения Солнца и интенсивности потока космических лучей – комплекса, который и поныне функционирует, уже в модернизированном виде, и является гордостью современного Института. В 70-ые годы был создан макет установки для изучения доплеровского смещения частоты отраженных от ионосферы сигналов при наклонном, а позднее, и вертикальном зондировании, что позволило исследовать тонкую структуру ионизированной плазмы и провести цикл работ по изучению волновых процессов в ионосфере, что поставило войти Сектору ионосферы в ряд ведущих организаций в области исследований физики околоземного космического пространства, проводимых в Советском Союзе.

К своей юбилейной дате (70-летию со дня рождения) в июле 1983 года, Мария Петровна Рудина воплотила задуманное и в тесном сотрудничестве с соратниками реализовала высокий уровень научно-организационной деятельности Сектора ионосферы, который позволил реорганизовать Сектор в Институт ионосферы. Мария Петровна всегда поощряла творческие инициативы сотрудников, поддерживала широкие связи с учеными Союза и дальнего зарубежья, с материнской заботой относилась к руководимому ей молодежному коллективу, чем снискала глубокое уважение сотрудников и обеспечила в коллективе здоровый моральный климат. Марией Петровной опубликовано более 100 научных работ, выпущено три монографии и подготовлено более 20 кандидатов физико-математических наук, многие из которых и поныне работают в Институте и продолжают начатое ей дело.

МАЗМҰНЫ

Алғы сөз	4
1 <i>Дробжев В.И., Құрманов Б.К., Жұмбаев Б.Т., Мұқашева С.Н.</i> Ұйымдастырылуы, қалыптасуы және институттың қазіргі жағдайы	6
2 <i>Жантаев Ж.Ш., Құрманов Б.К., Хачикян Г.Я., Ким А.С., Жұмбаев Б.Т.</i> Литоғарыштық ауа-райы (мәселенің қазіргі күйі)	22
3 <i>Бреусов Н.Г., Шигаев Д.Т., Асанқулов Н.А., Ахметтаев Е.М.</i> Жезді, Шоқай Жәнеашысу су богендері мысаллында гидротехникалық ғимараттарды георадарлық технологияларды қолданып зерттеу.	42
4 Передеро В.С. , <i>Виляев А.В., Бибосинов А.Ж., Серікбаева Э.Б.</i> Қазақстанның мұнай-газ кешені Каспий маңы ойпатының мысалы негізінде аймақтың геологиялық ерекшеліктерін зерттеу үшін, арақашықтықтан зондылаудың мәліметтерін қолдану	49
5 <i>Голубов Б.Н., Лобковский Л.И., Мар Г.Н., Турунтаев С.Б. Жантаев Ж.Ш., Бреусов Н.Г., Виляев А.В.</i> Өзен мұнай және газ қорлары жер дүмпулерінің түрткісі ретінде және оның қауіпін төмендету амалдары	58
6 <i>Дәуренбек Қ. Ә.</i> Кейбір геофизика есептерді шығаратын көп өлшемді геометрия әдістерін қолдануы	85
7 <i>Иванчукова А.В., Кирсанов А.В., Туребекова Д.Н.</i> Жердің дистанциялық барлап байқау мәліметтері мен территория мұнай перспективтілігін бағалау	90
8 <i>Сомсиков В.М.</i> Ашық тепе-теңсіздік газ-радиация жүйесіндегі атмосфера динамик	101
9 <i>Сомсиков В.М., Нұрғалиева Қ.Е., Нурмуханбетова К.Ж.</i> Тепе-теңсіздік жүйедегі ашылған – жоғары атмосферадағы толқындық ауытқу	123
10 <i>Қрякунова О.Н.</i> Ғарыштық ауа-райын биік таулы нейтрондық монитор көмегімен ғарыштық сәулелену вариацияларын зерттеу	137
11 <i>Антонова В.П.</i> Электрлік өрістерді биік таулы кешен бойынша өлшеу	148
12 <i>Ляхов В.В., Нецадим В.М.</i> Магнитосфералық шектің ток қабаттын зерттеудің жағдайы	158

13 <i>Ляхов В.В., Нецадим В.М., Акасов С.Б.</i> Магнитопаузалық тұрақты үлгі	179
14 <i>Аиқалиев Я.Ф., Мұқашева С.Н., Нұрғалиева Қ.Е., Нұрақынов С.М.</i> Ионосфераның толық электрондық мазмұнының уақыт-көліктік үлестірімі	201
15 <i>Гонтарев О.Г., Жұмабаев Б.Т., Левин Ю.Н., Ақасов С.Б., Бобров М.Н., Николаевский Н.Ф., Водяников В.В.</i> Қазақстанда бүгінгі радиоастрономия	209
16 <i>Қраснов В.М., Н.М. Салихов, Б.Т. Жумабаев.</i> Қазақстандағы ионосфераны зерттеудегі Доплерлік әдістің тарихы және болашағы	221
17 <i>Козин И.Д., Васильев И.В., Федулina И.Н.</i> Жер сілкінісін болжау тәсілдері. Төменгі ионсфераны зерттеу бойынша, жерсілкінісін болжау ионсфералық әдіспен және радио толқындардың километрлік диапазонда таралуы	232
18 <i>Соколова О.И.</i> Алматы геомагниттік обсерваториясының тарихының қазіргі жағдайы	243
19 <i>Салихов Н.М., Сомиков В.М., Жұмабаев Б.Т.</i> 2011 Жылы Қапшағай жер сілкінісінің келесі күннің қарсаңында жерге жақын атмосфералық электрдің фон вариацияларының ерекшеліктері	253
20 <i>Соколова О.И., Бурлаков Г.В., Качусова О.Л.</i> 2005-2011жж обсерваториялық бақылау мәліметтері бойынша кеңістікті-уақытша вариациялық геомагниттік жіктеулерді зерттеу	262
21 <i>Тойшиев Н.С.</i> Асинхронды қозғалтқышты тікелей іске қосуды зерттеу	268
22 Институттың қазіргі жағдайы	275
23 Мерейгой	294
24 Еске алу	296

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1 <i>Дробжев В.И., Жумабаев Б.Т., Құрманов Б.К., Мукашева С.Н.</i> Организация, становление и современное состояние Института ионосферы	6
2 <i>Жантаев Ж.Ш., Құрманов Б.К., Хачикян Г.Я., Ким А.С., Жумабаев Б.Т.</i> Литокосмическая погода (современное состояние проблемы)	22
3 <i>Бреусов Н.Г., Шигаев Д.Т., Асанкулов Н.А., Ахметтаев Е.М. Сатыбалдиев Д.С.</i> Обследование гидротехнических сооружений с помощью георадарных технологий на примере Жездинского, Шокайского и Ащисуйского водохранилищ	42
4 Передеро В.С. , <i>Виляев А.В., Бибосынов А.Ж., Серикбаева Э.Б.</i> Использование данных ДЗЗ для изучения геологических особенностей территорий на примере Прикаспийской впадины в нефтегазоносном комплексе Казахстана	49
5 <i>Голубов Б.Н., Лобковский Л.И., Мар Г.Н., Турунтаев С.Б., Жантаев Ж.Ш., Бреусов Н.Г., Виляев А.В.</i> Нефтегазовое месторождение Узень как назревающий очаг вызванной сейсмичности и пути снижения её риска	58
6 <i>Дауренбек К.А.</i> Применение методов многомерной геометрии при решении некоторых задач геофизики	85
7 <i>Иванчукова А.В., Кирсанов А.В., Турбекова Д.Н.</i> Данные дистанционного зондирования земли и оценка нефтеперспективности территорий	90
8 <i>Сомсиков В.М.</i> Динамика атмосферы как открытой неравновесной системы газ - радиация	101
9 <i>Сомсиков В.М., Нұрғалиева Қ.Е., Нурмуханбетова К.Ж.</i> Волновые возмущения в верхней атмосфере – открытой неравновесной системе	123
10 <i>Крякунова О.Н.</i> Исследования космической погоды по вариациям космических лучей с помощью высокогорного нейтронного монитора	137
11 <i>Антонова В.П.</i> Высокогорный комплекс по измерению электрических полей	148
12 <i>Ляхов В.В., Нецадим В.М.</i> О состоянии исследования токового слоя хвоста магнитосферы	158

13 <i>Ляхов В.В., Нецадим В.М., Акасов С.Б.</i> Стационарная модель магнитопаузы	179
14 <i>Ашкалиев Я.Ф., Мукашева С.Н., Нургалиева К.Е., Нуракынов С.М.</i> Пространственно-временное распределение полного электронного содержания ионосферы	201
15 <i>Гонтарев О.Г., Жумабаев Б.Т., Левин Ю.Н., Акасов С.Б., Бобров М.В., Николаевский Н.Ф., Водяников В.В.</i> Радиоастрономия в Казахстане сегодня	209
16 <i>Краснов В.М., Салихов Н.М., Жумабаев Б.Т.</i> История и перспективы доплеровского метода исследования ионосферы в Казахстане	221
17 <i>Козин И.Д., Васильев И.В., Федулina И.Н.</i> Об исследованиях нижней ионосферы, распространения радиоволн километрового диапазона и ионосферном методе прогноза землетрясений	232
18 <i>Соколова О.И.</i> Геомагнитная обсерватория «Алма-Ата» история и современное состояние	243
19 <i>Салихов Н.М., В.М.Сомсиков, Б.Т.Жумабаев.</i> Особенности фоновых вариаций приземного атмосферного электричества накануне Капчагайского землетрясения 2011 года	253
20 <i>Соколова О.И., Бурлаков Г.В., Качусова О.Л.</i> Исследование пространственно-временных вариаций геомагнитного склонения по данным магнитных обсерваторий за 2005–2011 гг	262
21 <i>Тойшиев Н.С.</i> Исследование прямого пуска асинхронного двигателя	268
22 Современная структура Института	275
23 Юбилейные даты	294
24 Памятные даты	296

CONTENT

Preface	4
1 <i>Drobzhev V.I., Zhumabayev B.T., Kurmanov B.K., Mukasheva S.N.</i> Organization, formation and current state of Institute	6
2 <i>Zhantaev Zh.Sh., Kurmanov B.K., Khachikyan G.Ya., Kim A.S., Zhumabaev B.T.</i> Litho-Space weather: modern state of problem	22
3 <i>Breusov N.G., Shigaev, D.T., Asankulov N.A., Akhmetaev EM., Satybaldyev D.S.</i> Survey of hydraulic structures using GPR radar technology on example of Zhezdinsk, Shokaysk and Aschisuysk reservoirs	42
4 <i>Peredero B.C.</i> , <i>Vilyaev A.V., Bitbossinov A.Zh., Serikbaeva E.B.</i> Using remote sensing data for study of geological area features on example of Caspian basin in Khazakhstan oil and gas complexes	49
5 <i>Golubov B.N., Lobkovski L.I., Mar G.N., Turuntaev S.B., Zhantaev Zh.Sh., Breusov N.G., Vilyaev A.V.</i> River oil and gas field as a hotbed of maturing induced seismicity and ways to reduce its risk	58
6 <i>Daurenbek K.A.</i> Application of dimensional geometry in solving some problems of geophysics	85
7 <i>Ivanchukova A.V., Kirsanov A.V., Turebekova D.N.</i> Earth remote sensing data and evaluation of oil – bearing areas	90
8 <i>Somsikov V.M.</i> Dynamics of the atmosphere as open nonequilibrium system gas-radiation	101
9 <i>Somsikov V.M., Nurgalieva K.T., Nurmukhanbetova K.Zh.</i> Wave disturbances in the upper atmosphere - open nonequilibrium system	123
10 <i>Kryakunova O.N.</i> Space weather research by means cosmic ray variation of high altitude neutron monitor	137
11 <i>Antonova V.P.</i> High-mountain complex on atmospheric electric field measurements	148
12 <i>Lyakhov V.V., Neshchadim V.M.</i> State of research of magnetotail current sheet	158
13 <i>Lyakhov V.V., Neshchadim V.M., Akasov S.B.</i> Stationary model of the magnetopause	179
14 <i>Ashkaliev Ya.F., Mukasheva S.N., Nurgalieva K.E., Nurakinov S.M.</i> Spatial and temporal distribution of total electron content of ionosphere	201

15 <i>Gontarev O.G., Zhumabaev B.T., Levin Yu.N., Akasov C.M., Bobrov M.N., Nikolaevsky N.F., Vodjannikov V.V.</i> Radioastronomy in Khazakhstan today	209
16 <i>Krasnov V.M., Salikhov N.M., Zhumabaev B.T.</i> Past and future of Dopler method of ionosphere investigations in Khazakhstan	221
17 <i>Kozin I.D., Vasilyev I.V., Fedulina I.N.</i> On investigations of the lower ionosphere, propagation of radiowaves of kilometre range, and ionospheric method of earthquake prediction	232
18 <i>Sokolova O.I.</i> Geomagnetic observatory “Alma-Ata” history and current status	243
19 <i>Salikhov N.M., Somsikov V.M., Zhumabaye B.T. v.</i> Features of background variations of the surface atmospheric electricity on the eve of Kapchagay earthquake in 2011	253
20 <i>Sokolova O. I., Burlakov G.V., Kashusova O.L.</i> The space-time variations the geomagnetic declination according to “Alma-Ata” observatory observations for the period 2005-2011	262
21 <i>Toishiev N.S.</i> Study of direct start induction motor	268
22 The modern Institute structure	275
23 Anniversaries	294
22 Memorials	296

«Геодинамика и солнечно-земные связи»

Алматы: ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», 2013. — 293с.

ISBN 978-601-80431-2-3

ПГ 35 Материал для сборника, состоящего из научных статей, исторических дат и памятных фотографий, посвященных 70-летию ионосферных исследований в Казахстане, 30-летию реорганизации Сектора ионосферы и Института ионосферы, его становлению, достижениям и перспективам развития подготовлен сотрудниками ДТОО «Института ионосферы» АО «НЦКИТ».

УДК 550.3

ББК 22.632

© АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2013

© ДТОО «Институт ионосферы», 2013

© ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», оформление, 2013

ISBN 978-601-80431-2-3

ГЕОДИНАМИКА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

Дизайнер: *Яхия А.*
Компьютерная верстка: *Яхия А.*

Подписано в печать 19.12.13.
Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Уч. изд. печ. л. 18.5
Тираж 100 экз.

Издательство «А-Три Принт»
г.Алматы, ул. Макагаева 117
Тел: 328 34 88

Типография «А-Три Принт»
г.Алматы, ул. Макагаева 117
Тел: 328 34 88

