

# Грант РФФИ 12-05-00152-а «Математическое моделирование влияния магнитосферных и ионосферных процессов на атмосферные электрические поля»

**Руководитель:** д.ф.-м.н., профессор В.В. Денисенко

## ВВЕДЕНИЕ

В литературе довольно большое внимание уделяется вопросам влияния импульсных вариаций динамического давления солнечного ветра, поскольку эти вариации вызывают существенные деформации границы магнитосферы, возбуждают волновые моды внутри магнитосферы, и имеют важные ионосферные проявления. В работе [1] (Sergeev et al., 1986) изучены временные задержки от клика конвекции полярной шапки и начала суббури в ответ на резкие и изолированные разрывы направления межпланетного магнитного поля с учетом ориентации нормали. Показано, что рост и спадание конвекции в полярной шапке следует с 10 минутной задержкой после поворота от севера к югу и от юга к северу в подсолнечной точке головной ударной волны, которая располагается на расстоянии около  $14 R_E$  от центра Земли. Отмечена явная зависимость начала суббури от ориентации разрыва и показано, что начало запаздывает в среднем на 8-10 минут с момента первого контакта разрыва с головной ударной волной. Это свидетельствует о том, что триггер суббури связан с возмущениями, возникающими при взаимодействии разрыва с магнитосферой и распространяющимися со скоростью быстрой магнитозвуковой волны. Эффективность триггера и время задержки не зависят от типа разрыва (тангенциальный или вращательный). Эти результаты показывают, что взрывная фаза суббури, инициированная разрывом направления межпланетного магнитного поля, является реальным и часто встречающимся феноменом. В работе [2] (Sibeck, 1990) рассмотрены ионосферно-магнитосферные эффекты, связанные с короткими импульсами динамического давления солнечного ветра большой амплитуды, имеющими

временные масштабы от 5 до 15 минут и происходящими довольно часто в солнечном ветре перед головной ударной волной. Анализ спутниковых и наземных данных [3] (Wu et al., 1993) показывает, что взаимодействие импульсов динамического давления солнечного ветра с магнитосферой создает сильные возмущения скорости плазмы в пограничном слое вблизи магнитопаузы. Это в свою очередь приводит к возникновению вихревых течений в полярной ионосфере. Однако перед тем как достигнуть магнитопаузы, межпланетные импульсы давления должны пройти через ударную волну и переходный слой. Вариации динамического давления в солнечном ветре могут быть связаны с ударными разрывами, магнитными «дырами» и тангенциальными разрывами, существующими в межпланетной среде. В работе [3] (Wu et al., 1993) рассматривалась задача взаимодействия межпланетных тангенциальных разрывов с головной ударной волной в подсолнечной области на основе теоретического анализа и компьютерного моделирования. В работе [4] (Fairfield et al., 2003) представлены данные спутников Geotail и Interball в период относительно постоянного северного ММП 10–11 января 1997. На основании этих данных проанализированы перемещения магнитопаузы с пограничным слоем, вызванные разрывами давления в солнечном ветре и неустойчивостью Кельвина Гельмгольца. В работе [5] (Shukhtina et al., 2002) на основе изучения тщательно отобранных плоских разрывов было обнаружено, что ориентация разрыва в солнечном ветре существенно влияет на временную задержку генерируемых волн сжатия и разрежения, распространяющихся в хвост магнитосферы. В данной работе отмечается важность этого эффекта для изучения динамики хвоста и проблемы инициирования магнитосферной суббури.

В предлагаемом проекте авторы использовали результаты перечисленных выше работ, сосредотачивая усилия на недостаточно изученных аспектах проблемы, таких как трехмерное взаимодействие магнитосферы с тангенциальными разрывами различных типов и магнитными «дырами», влияние ориентации плоскости тангенциального

разрыва на его взаимодействие с магнитосферой, времена транспортировки разрывов от ударной волны до магнитопаузы, характер возмущений на флангах переходного слоя, возмущения магнитопаузы и пограничного слоя, формирование х-точек на магнитопаузе в случае прихода фронта южного межпланетного магнитного поля, связь с ионосферой, вопросы триггера субббури.

Изучение процессов, формирующих атмосферное электрическое поле, является важным направлением теории атмосферы и представляет большой практический интерес. Значительная часть исследований, проведенных в последнее десятилетие, посвящена атмосферному электрическому полю как агенту, осуществляющему связь литосферы с ионосферой. Обзор современного состояния исследований дан в монографии [6] (Molchanov, Naayakawa, 2008). Имеются наблюдения возмущения ионосферы в периоды сейсмической активности [7] (Liperovsky, et al., 2000). По-видимому, в настоящее время наиболее совершенными моделями электрической связи литосферы с ионосферой считаются модели, представленные в монографии [8] (Pulinets, Boyarchuk, 2004) и в статье [9] (Sorokin, et al., 2007). По нашему мнению, в этих, как во многих других проводимых исследованиях используются упрощенные подходы, обусловленные ограничениями математических методов, что снижает доказательность полученных результатов. Ранее созданные нами математические методы, необходимые для выполнения проекта, и вспомогательные модели отдельных явлений представлены в статьях [10-17].

На наш взгляд, в существующих исследованиях недостаточное внимание уделяется процессу, идущему в обратном направлении, от ионосферы к земле, и именно ему, в значительной мере, посвящена атмосферная часть настоящего проекта.

В результате выполнения проекта будет создана математическая модель глобального проводника, включающая атмосферу и ионосферу, более совершенная, чем все ныне существующие модели. Мы надеемся, что с ее

использованием удастся объяснить ряд наблюдаемых эффектов и сделать доказательные утверждения о невозможности их объяснения в рамках стационарной модели электропроводности, и тогда потребуется анализ других физических механизмов, таких как предложенные в работе [18] (Gokhberg, et al., 1989). В частности, мы планируем доказать, что корреляцию между напряженностью электрического поля в приземной атмосфере и в ионосфере нельзя трактовать как проникновение в ионосферу поля с поверхности Земли.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Выбор направления исследований обусловлен сформулированным во введении современным состоянием моделирования магнитосферно-ионосферных связей. Решение поставленных задач позволяет глубже понять природу явлений и получить количественные характеристики процессов.

Метод, использованный в ходе выполнения проекта, представляет собой математическое моделирование, основанное на применении уравнений магнитной гидродинамики. Главной особенностью применяемых методов является выделение пограничных слоев и тонких магнитных трубок, что позволяет существенно упростить исходную задачу и расщепить ее на задачи меньшей размерности. Для построения модели ионосферных электрических полей мы используем приближение эквипотенциальности магнитных силовых линий в основной части ионосферы, точность которого нами обоснована в рамках метода разложения по малому параметру. В качестве численных алгоритмов при математическом моделировании ионосферных и атмосферных электрических полей мы используем известные как наиболее эффективные многосеточные методы решения уравнения электропроводности.

В результате выполнения проекта получены следующие научные результаты. На основе трехмерной магнитогазодинамической модели обтекания магнитосферы Земли исследованы особенности течения плазмы вблизи границы магнитосферы для различных направлений и интенсивностей межпланетного магнитного поля. МГД моделирование показало, что плазма в магнитослое может значительно ускоряться искривленным межпланетным магнитным полем, драпирующимся вокруг магнитосферы. При этом скорость потока может значительно превышать скорость невозмущенного солнечного ветра. Это превышение может достигать 60%. Эффект ускорения выражен тем сильнее, чем меньше значение параметра Маха-Альфвена в солнечном ветре. Область ускоренного

потока существенно зависит от направления межпланетного магнитного поля. При северном направлении наибольшее ускорение отмечается в экваториальной области. С целью экспериментальной проверки модельных расчетов выполнен статистический анализ спутниковых данных об обтекании солнечным ветром магнитосферы Земли. Специально анализировались факты, свидетельствующие о значительном ускорении плазмы солнечного ветра в области хвоста магнитосферы. Показано, что данные об ускоренных потоках хорошо согласуются с предложенной математической моделью.

Исследованы зависимости магнитного поля и параметров плазмы на границе магнитосферы от параметров солнечного ветра. Получены значения электрического и магнитного полей, на X-линии магнитного пересоединения на границе магнитосферы для различных параметров солнечного ветра. На основе имеющейся МГД модели рассмотрены аномальные особенности поведения параметров плазмы и магнитного поля в переходном слое (магнитослое) во время прохождения магнитного облака. Для данного события характерно значительное уменьшение параметра Маха-Альфвена в солнечном ветре, что приводит к существенному увеличению толщины переходного слоя (магнитослоя) и уменьшению плазменного параметра бета. Доминирующее магнитное давление существенно изменяет картину течения в переходном слое, ускоряя плазму поперек магнитных силовых линий. Усиление магнитного поля способствует магнитному пересоединению на магнитопаузе. По расчетным профилям магнитного поля, скорости и плотности вдоль линии «Земля-Солнце» при заданном значении параметра Петчека  $g$ , характеризующего скорость пересоединения, были определены значения магнитного поля, плотности и напряженности электрического поля вблизи линии пересоединения в зависимости от параметра Маха-Альфвена.

Получена оценка эффективной проводимости на X-линии в хвосте магнитосферы, в которой фигурирует электронная гирочастота вместо частоты парных столкновений. Такая проводимость оказывается аномально

низкой и соответствует Бомовской диффузии. Для проверки полученных аналитических оценок параметров диффузионной области использовались результаты PIC моделирования. При этом использован подход типа Свита-Паркера применительно к внутренней электронной диффузионной зоне бесстолкновительного магнитного пересоединения. На основе анализа движения заряженных частиц вблизи X-линии получена аппроксимация недиагональных членов тензора электронного давления. Оценки показали, что ширина внутренней электронной диффузионной равна по порядку величины электронной инерционной длине, и электроны ускоряются до альфвеновской скорости в направлении X-линии.

Проведено численное исследование моды "двойного градиента", которая предположительно связана с "флэппинг" колебаниями магнитосферного хвоста - вертикальными колебаниями магнитосферного плазменного слоя с периодом 100-200 с. Эта мода становится неустойчивой в области, где нормальная к токовому слою компонента магнитного поля растет в направлении хвоста. Исследовано поведение "kink" - ветви данной моды на фоне равновесной конфигурации. На первом этапе неустойчивость исследовалась в рамках линеаризованной постановки задачи. Полученные численные результаты были в удовлетворительном согласии с полученными ранее аналитическими оценками инкремента. Также собственные функции, найденные с помощью упрощенной аналитической теории, подобны найденным в результате численных экспериментов. Далее, линейный численный анализ был дополнен полным трехмерным нелинейным МГД моделированием. Неустойчивость инициировалась на фоне равновесной конфигурации, которая также определялась методом численной релаксации. Показано, что токовый слой с "обратным " градиентом  $V_z$  компоненты магнитного поля неустойчив относительно изгибных деформаций с длинами волн, превышающими радиус кривизны магнитного поля. Когда градиент  $V_z$  компоненты меняет знак в пределах токового слоя, сегмент слоя с "нормальным" градиентом  $V_z$  (направленным к Земле) оказывает глобальное

стабилизирующий влияние на весь слой. В этом случае общий инкремент неустойчивости близок к теоретическому значению, усредненному по всей расчетной области. Линейная стадия эволюции достигает насыщения, когда система переходит в нелинейный режим. Время выхода на нелинейную стадию в 130 раз превышает альфвеновское время.

Исследованы нелинейные колебания магнитных трубок в хвосте магнитосферы с учетом влияния ионосферной проводимости. Выполнено численное магнитогидродинамическое моделирование поведения неустойчивых изгибных деформаций токового слоя магнитосферного хвоста. Показано, что неустойчивость возникает в областях отрицательного градиента нормальной компоненты магнитного поля в хвосте магнитосферы. Получены результаты численного моделирования на основе линейной двумерной и нелинейной трехмерной магнитогидродинамических моделей. Определено время выхода решения на нелинейную стадию. Получены дисперсионные зависимости и проведено сравнение с упрощенной аналитической теорией. Перемещения неустойчивых магнитных трубок поперек плазменного слоя порождают альфвеновские волны, которые распространяются к ионосфере.

Наряду с анализом электрического взаимодействия магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли, аналогичные модели построены для других планет Солнечной системы, а также для экзопланет. Важным результатом является сопоставление процессов расширения атмосфер, так называемых, «супер-Земель» и «горячих Юпитеров».

Усовершенствована модель электрической связи магнитосферных объектов с ионосферой. В этой модели магнитные силовые линии считаются эквипотенциальными, а их форма рассчитывается с помощью созданной нами ранее модели магнитосферного магнитного поля. В известных моделях поля, таких как модели Цыганенко, заложены гораздо более полные данные об особенностях поля в различных геомагнитных условиях. Наш подход менее совершенен в этом отношении, но имеет преимущество, связанное с



аккуратным учетом поведения поля вблизи магнитопаузы, что существенно при построении магнитных силовых линий и проецировании электрического потенциала из магнитосферы в ионосферу.

Создана квазистационарная трехмерная модель электрических полей и токов в проводнике, состоящем из атмосферы и ионосферы Земли. Результаты трехмерной модели удобнее для объяснения и интерпретации, чем двумерные. Проанализированы известные подходы к учету ионосферы с помощью граничного условия для атмосферного проводника. Показано, что при моделировании проникновения крупномасштабных электрических полей от земли в ионосферу достаточно учитывать только интегральную проводимость ионосферы, и недопустимо игнорировать проводимость ионосферы или полагать ее бесконечной. Получающееся проникновение электрического поля от земли в ионосферу настолько мало, что ионосферные электрические поля, рассматриваемые некоторыми исследователями как предвестники землетрясений, не могут быть объяснены как проникновение электрического поля от земли в ионосферу по проводнику, состоящему из атмосферы и ионосферы. Поскольку ни одна из существующих моделей не может объяснить проникновение электрического поля от земли в ионосферу по атмосферному проводнику, и добавление сторонних токов не помогает, мы пришли к заключению о необходимости рассматривать иные физические процессы для объяснения ионосферных предвестников землетрясений.

Построена математическая модель вариаций крупномасштабного электрического поля в ионосфере за счет возникновения неоднородностей проводимости. Эта модель предназначена для исследования ионосферных предвестников землетрясений в рамках представлений, альтернативных некоторым популярным моделям. По крайней мере, в рамках настоящего проекта мы показали ошибочность пока господствующей точки зрения о непосредственном проникновении квазистационарного электрического поля через атмосферу. Мы полагаем, что наблюдаемые изменения ионосферного электрического поля в ионосфере накануне землетрясений вызываются

возмущениями температуры и степени ионизации ионосферной среды, которые, в свою очередь, обусловлены проникновением каких-то волн от земли. Анализ такой причинно-следственной связи явлений потребует количественного моделирования генерации волн в литосфере, их прохождения через атмосферу и их поглощения в ионосфере, что далеко выходит за рамки настоящего проекта.

Усовершенствована построенная ранее математическая модель проникновения электрического поля из ионосферы в атмосферу в спокойных геомагнитных условиях и во время суббурь. Проведено сравнение результатов моделирования с данными измерений электрического поля в Антарктиде. Показано, что относительные вариации поля в модели и в эксперименте согласуются, а средняя напряженность измеренного поля могла бы быть объяснена, если предположить, что проводимость воздуха гораздо быстрее растет с высотой над Антарктидой, чем в средних широтах. Непосредственные измерения высотного хода проводимости воздуха в Антарктиде, по-видимому, не проводились, поэтому проверить эту гипотезу, возникшую при выполнении проекта, пока не удалось.

Созданы модели проникновения в ионосферу электрического тока из отдельного грозового облака. Эти модели описывают облака, расположенные как в средних широтах, так и в экваториальной атмосфере. Построены области в ионосфере, в которые втекают эти токи. Наиболее широкие области получают над облаками, вытянутыми поперёк геомагнитного экватора, что объясняется ролью холловской проводимости. Тем самым получен вклад отдельного облака в глобальную электрическую цепь.

Построена математическая модель ионосферных электрических полей, обусловленных глобальной грозовой активностью. Для численной реализации модели использована декомпозиция проводящей области на ионосферный проводник, для которого справедливо двумерное приближение, и атмосферный проводник с изотропной проводимостью. Оценена погрешность такого приближения. Математическое моделирование показало,

что замыкание этой глобальной электрической цепи в ионосфере происходит за счет разности потенциалов менее 50 В, и напряженность соответствующего электрического поля не превосходит 10 мкВ/м, тогда как традиционно считалось, что эти поля в десятки раз больше. Такое отличие на порядок выходных параметров нашей модели от результатов общепринятых моделей при примерно тех же значениях входных параметров в рамках той же стационарной модели электропроводности объясняется нашим более корректным учетом ионосферной проводимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным выводом из проведенного математического моделирования является опровержение возможности построения спутниковой системы прогнозирования землетрясений на основе теории о проникновении квазистационарного электрического поля от поверхности Земли в ионосферу.

В результате исследований построены математические модели магнитосферных генераторов электрического поля. Определены особенности пространственного распределения проводимости в магнитосфере, знание которых необходимо для исследования процессов магнитного пересоединения, определяющих трансформацию энергии магнитного поля в электрическую энергию.

Теоретически доказано, что замыкание глобальной электрической цепи в ионосфере происходит за счет разности потенциалов менее 50 В при напряженности электрического поля менее 10 мкВ/м, тогда как традиционно считалось, что эти поля в десятки раз больше.

Поставленные цели в ходе выполнения проекта полностью достигнуты.

Анализ публикаций на данную тему и сравнение с результатами других авторов позволяет сделать вывод о соответствии наших результатов мировому уровню в данной области науки.

На основе разработанной полуаналитической модели обтекания исследовано влияние северного межпланетного магнитного поля на распределение скорости, плотности и давления плазмы солнечного ветра в переходном слое вблизи границы магнитосферы.

Впервые выполнено трехмерное численное моделирование МГД неустойчивости токового слоя магнитосферного хвоста, связанной с градиентом нормальной компоненты магнитного поля. Полученные в нашей работе дисперсионные зависимости использовались другими авторами для анализа экспериментальных данных спутниковых группировок CLUSTER и

THEMIS, касающихся флэппинг колебаний в хвосте магнитосферы. Было отмечено неплохое согласие модели с данными.

Нами показано, что получающееся в модели электропроводности при надлежащем учете ионосферной проводимости проникновение электрического поля от земли в ионосферу настолько мало, что ионосферные электрические поля, рассматриваемые многими российскими и иностранными исследователями как предвестники землетрясений, не могут быть объяснены как проникновение электрического поля от земли в ионосферу по проводнику, состоящему из атмосферы и ионосферы.

Аналогичное принципиальное уточнение принятых в мировой науке моделей выполнено и для глобальной электрической цепи, генератором в которой является глобальная грозовая активность.

О мировом уровне полученных результатов свидетельствует и тот факт, что они докладывались на международных конференциях, 17 статей опубликованы в Российских и международных журналах, входящих в системы цитирования Web of science, Scopus.

## Список публикаций по проекту

1 Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Sasunov Y.L., Lammer H., Kislyakova K.G., Erkaev N.V. Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. I. Modelling of hydrodynamic escape of upper atmospheric material. // *The Astrophysical Journal*. - 2014. - V. 795. – P. 132-146. - doi:10.1088/0004-637X/795/2/132

2 Lammer, H., Stoekl, A., Erkaev, N.V., Dorfi, E.A., Odert, P., Guedel, M., Kulikov, Yu.N., Kislyakova, K.G., Leitzinger, M. Origin and loss of nebula-captured hydrogen envelopes from ‘sub’- to ‘super-Earths’ in the habitable zone of Sun-like stars. // *MNRAS*. - 2014. - V. 439. - P. 3225–3238.

3 Erkaev, N.V., Lammer, H., Elkins-Tanton, L., Stoekl, A., Odert, P., Marcq, E., Dorfi, E., Kislyakova, K.G., Kulikov, Yu.N., Leitzinger, M., Guedel, M. Escape of the martian protoatmosphere and initial water inventory. // *Planetary and Space Science*. - 2014. - V. 98. - P. 106–119.

4 Erkaev, N.V., Farrugia, C., Mezentsev, A.V., Torbert, R., Biernat, H.K. Slow mode structure in the nightside magnetosheath related to IMF draping. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – V. 119. – N. 2. - P. 1121–1128.

5 Kubyshkina, D.I., D.A. Sormakov, V.A. Sergeev, V.S. Semenov, N.V. Erkaev, I.V. Kubyshkin, N.Yu. Ganushkina, S.V. DUBYAGIN. How to distinguish between kink and sausage modes in flapping oscillations? // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – V. 119. – N. 4. - P. 3002–3015.

6 Kislyakova, K.G., Johnstone, C., Odert, P., Erkaev, N.V., Lammer, H., Luftinger, T., Holmstrom, M., Khodachenko, M.L., Guedel, M. Stellar wind interaction and pick-up ion escape of the Kepler-11 “super-Earths”. // *Astronomy&Astrophysics*. - 2014. - V. 562. - P. A116 (1-8).

7 Denisenko, V.V., M. Ampferer, E.V. Pomozov, A.V. Kitaev, W. Hausleitner, G. Stangl, H.K. Biernat. On electric field penetration from ground into the ionosphere. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. - V. 102. - P. 341-353. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.019

8 Korovinskiy, D.B., V. S. Semenov, A. Divin, G. Lapenta, N. V. Erkaev, S. Markidis, V. V. Ivanova, H. K. Biernat, I. B. Ivanov, and M. Zellinger. MHD modeling of the double-gradient (kink) magnetic instability. // *Journal of Geophysical research*. - 2013. - V. 118. - P. 1146-1158.

9 Farrugia, C.J., N.V. Erkaev, V.K. Jordanova, N. Lugaz, P.E. Sandholt, S. Muhlbachler, R.B. Torbert. Features of the interaction of interplanetary coronal mass ejections / magnetic clouds with the Earth magnetosphere. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. - 2013. - V. 99. - P. 14-26.

10 Harris, B., Farrugia, C.J., Erkaev, N.V., Biernat, H.K., Torbert, R.B.. Observational aspects of IMF draping-related magnetosheath accelerations for northward IMF. // *Annales Geophysicae*. - 2013. - V. 31. - P. 1779-1789.

11 Erkaev, N.V., Semenov, V.S., Biernat, H.K. Current sheet oscillations in the magnetic filament approach. // *Physics of Plasmas*. - 2012. - V. 19. - P. 062905 (1-9).

12 Divin, A., G. Lapenta, S. Markidis, V.S. Semenov, N.V. Erkaev, D.B. Korovinskiy and H.K. Biernat. Scaling of the inner electron diffusion region in collisionless magnetic reconnection. // *Journal of Geophysical Research*. - 2012. - V. 117. - P. A06217 (1-11).

13 Lammer, H., Erkaev, N.V., Odert, P., Kislyakova, K.G., Leitzinger, M., Khodachenko, M.L. Probing the blow-off criteria of hydrogen-rich "super-Earths". // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 2013. - V. 430. - P. 1247-1256.

14 Desroche, M., F. Bagenal, P.A. Delamere, N.V. Erkaev. Conditions at the magnetopause of Saturn and implications for the solar wind interaction. // *Journal of Geophysical research*. - 2013. - V. 118. - P. 3087-3095.

15 Erkaev, N.V., H. Lammer, P. Odert, Yu. N. Kulikov, K. G. Kislyakova, M. L. Khodachenko, M. Guedel, A. Hanslmeier, H. Biernat. Atmospheric expansion and thermal escape. // *Astrobiology*. - 2013. - V. 13. - P. 1011-1029.

16 Kislyakova, K.G., H. Lammer, M. Holmstroem, M. Panchenko, P. Odert, N. V. Erkaev, M. Leitzinger, M. L. Khodachenko, Yu. N. Kulikov, M. Gedel, A.

Hanslmeier. XUV exposed, non-hydrostatic hydrogen-rich upper atmospheres of terrestrial planets. Part II: Hydrogen coronae and ion escape. // *Astrobiology*. - 2013. - V. 13. - P. 1030-1048.

17 Denisenko, V.V. Energy Method for Mathematical Modeling of Heat Transfer in 2-D Flow. // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2014. - V. 7(4). - P. 431-442.

18 Denisenko, V.V. Justification of the two-dimensional model of electroconductivity for the Earth ionosphere. // *Computational research*. - 2013. - V. 1. - P. 34-51.

19 Denisenko, V.V. Discussion of the model of atmospheric conductor with extrinsic currents which is often used for explanation of the electric field penetration into the ionosphere from ground. *Proceedings of the 9-th International Conference "PROBLEMS OF GEOCOSMOS"*. St. Petersburg. - 2012. - P. 77-80.

20 Denisenko, V.V., Hausleitner, W., Stangl, G., Biernat, H.K. Mathematical simulation of quasi-stationary electric fields penetration through the Earth atmosphere. *Proceedings of the 9-th International Conference PROBLEMS OF GEOCOSMOS*. St. Petersburg. - 2012. - P. 781-86.

21 Denisenko, V.V. Electric current penetration from a thunderstorm cloud into the middle-latitude ionosphere. Editors: V. N. Troyan et al. *Proceedings of the 10-th International Conference "Problems of Geocosmos"*. St. Petersburg. - 2014. - P. 76-81.

22 Denisenko V.V. Electric current penetration from a thunderstorm cloud into the ionosphere at the geomagnetic equator. Editors: V. N. Troyan et al. *Proceedings of the 10-th International Conference "Problems of Geocosmos"*. St. Petersburg. - 2014. - P. 82-87.

23 Denisenko V.V. Estimations of electric field penetration from ground into the ionosphere. // *Proceedings of IV International conference "Atmosphere, ionosphere, safety"*. Ed. I. V. Karpov. Kaliningrad. - 2014. - P.19-22.

24 Денисенко В.В. О проникновении атмосферного электрического поля в ионосферу. Глобальная электрическая цепь. *Материалы Всероссийской*



конференции / Геофизическая обсерватория "Борок" - филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль. - 2013. - С. 8-9

25 Денисенко В.В., О.Э. Якубайлик. Учет рельефа при вычислении сопротивления глобального атмосферного проводника. // Солнечно-Земная физика. - 2015. - Т. 1. - № 1.

DOI 10.12737/6044

## Список источников литературы

- 1 Sergeev, V.A., N.P. Dmitrieva, E S. Barkova, Triggering of substorm expansion by the IMF directional discontinuities: Time delay analysis. // Planetary and Space Science. - 1986. - V. 34. - N. 11. - P.1109-1118.
- 2 Sibeck, D.G. A model for the transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure changes. // J. Geophys. Res. - 1990. – V. 95. – P. 3755-3771.
- 3 Wu, B.H., M.E. Mandt, L.C. Lee, and J.K. Cao. Magnetospheric response to solar wind dynamic pressure variations: Interaction of interplanetary tangential discontinuities with the bow shock. // J. Geophys. Res. - 1993. - V. 21. P. 21,297-21,311.
- 4 Fairfield, D. H., C. J. Farrugia, T. Mukai, T. Nagai and A. Fedorov (2003) Motion of the dusk flank boundary layer caused by solar wind pressure changes and the Kelvin-Helmholtz instability: 10-11 January 1997 // J. Geophys. Res. - 2003. – V. 108. – P. 1460. - doi:10.1029/2003JA010134.
- 5 Shukhtina, M.A., V.A. Sergeev and S.A. Romanov. Magnetotail effects of slanted solar wind pressure discontinuities. // Advances in Space Research. - 2002. - V. 30. – N. 7. - P. 1825-1828.
- 6 Molchanov, O., Hayakawa, M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results. // TERRAPUB, Tokyo. - 2008.
- 7 Liperovsky, V.A., O.A. Pokhotelov, E.V. Liperovskaya, M. Parrot, C-V. Meister, and O.A. Alimov. Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity. // Surveys in Geophysics. - 2000. – V. 21. – P. 449-486.
- 8 Pulinets, S.A., Boyarchuk, K. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin Heidelberg New York: Springer. - 2004.
- 9 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.

10 Денисенко, В.В. Энергетический метод для трехмерных эллиптических уравнений с несимметричными тензорными коэффициентами. // Сибирский математический журнал. - 1997. - Т. 38. – N. 6. - С. 1267-1281.

11 Денисенко, В.В. Энергетический метод расчета квазистационарных атмосферных электрических полей. // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2011. - Т. 14. - N 1(45). - С. 56-69.

12 Денисенко, В.В., Замай, С.С., Китаев, А.В. Влияние вязкого трения между солнечным ветром и плазменным слоем на генерацию электрического поля в магнитосфере. // Геомагнетизм и аэрномия. - 2003. - Т. 43. - N 6. - С. 730-736.

13 Денисенко, В.В., Помозов, Е.В. Расчет глобальных электрических полей в земной атмосфере. // Вычислительные технологии. - 2010. - Т. 15. - N 5. - С. 34-50.

14 Denisenko, V.V., H.K. Biernat, A.V. Mezentsev, V.A. Shaidurov, and S.S. Zamay. Modification of conductivity due to acceleration of the ionospheric medium. // Annales Geophysicae. - 2008. - V. 26. - P. 2111-2130.

15 Denisenko, V.V., M.Y. Boudjada, M. Horn, E.V. Pomozov, H.K. Biernat, K. Schwingenschuh, H. Lammer, G. Prattes, and E. Cristea. Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere. // Natural Hazards and Earth System Sciences Journal. - 2008. - V. 8. - P. 1009-1017.

16 Denisenko, V.V., A.V. Kitaev, H.K. Biernat. Two dimensional model of magnetic field transfer through the magnetospheric tail due to plasma flow in the plasma sheet. // Proceedings of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos" (St. Petersburg, May 26-30, 2008), ed. by V.N. Troyan, M. Hayakawa, and V.S. Semenov, SPb. - 2008. - P. 52-56.

17 Denisenko, V.V., and Zamay, S.S. Electric field in the equatorial ionosphere. // Planetary and Space Science. - 1992. - V. 40. - N. 7. - P. 941-952.

18 Gokhberg, M.B., Gufeld, I.L., Rozhnoi, A.A., Marenko, V.F., Yampolshy, V.S., Ponomarev, E.A., Study of seismic influence on the ionosphere by super long

wave probing of the Earth–ionosphere waveguide. // Phys. Earth Planet. Inter. -  
1989. – V. 57. – P. 64–67.