

На правах рукописи



Бобровский Вадим Сергеевич

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА СЕТИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ,
ПРЕДВАРЯЮЩИХ СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

*Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых*

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
заведующий лабораторией физики колебаний пробных
масс ФГБУН ИФЗ РАН
Любушин Алексей Александрович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
«Приповерхностной геофизики»
ФГБУН Институт динамики геосфер РАН
Соловьев Сергей Петрович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент ка-
федры геофизики, Институт наук о Земле, Санкт-
Петербургский государственный университет
Сараев Александр Карпович

Ведущая организация: ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО
РАН

Защита диссертации состоится «22» февраля 2017 г. в 15:00 часов на заседании Диссертационно-
го совета Д212.121.07 в Российском Государственном Геологоразведочном Университете им.
Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Автореферат разослан

«__»_____ 2016 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета к.т.н., до-
цент



Романов Виктор Валерьевич

Актуальность темы диссертации. Задача прогноза землетрясений является ключевой проблемой современной геофизики. Хотя в настоящее время существует известный скептицизм в отношении её разрешимости; каждое новое сильное землетрясение, приведшее к значительному ущербу, снова ставит проблему прогноза на повестку дня. При этом особую актуальность имеет оперативный (в интервале времени до одного месяца) и краткосрочный (до одного года) прогноз землетрясений. В последние годы значительный прогресс достигнут в долгосрочном (от 5 до 15 лет) и среднесрочном (от одного года до 5 лет) прогнозировании землетрясений (работы В.Г. Кособокова, А.А. Любушина и др.). Однако, убедительных примеров, подтверждаемых статистикой, в оперативном прогнозе места, времени, магнитуды и вероятности сильного землетрясения пока не получено. По мнению многих исследователей, это связано с тем, что отсутствуют полноценные модели, описывающие процессы подготовки землетрясений, а также действующие сети мультипараметрического мониторинга в сейсмоопасных районах, т.к. решение задачи оперативного прогноза должно базироваться на данных инструментальных наблюдений, анализируемых в реальном времени.

В соответствии с мнением сейсмолога А.В. Николаева, комплексный анализ наблюдений относится к одной из ключевых проблем геофизического мониторинга, причём ведущая роль отдаётся эксперименту, а не теоретическим представлениям. В диссертации рассмотрены результаты разработки программно-аппаратных средства международной сети геоэлектрических измерений, уделяется внимание изучению нестационарных геоэлектрических сигналов, результатам расчёта коэффициентов корреляции пар каналов геоэлектрической станции и применению комплекта алгоритмов для комплексного статистического анализа разнородных данных (геоэлектрических и сейсмических).

В работе представлены результаты исследовательской и научно-организационной деятельности выполненных автором в Дистантной школе «Космо-Метео-Тектоника» в период с 2001 по 2015 гг. Диссертация выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.577.21.0109 от 22 сентября 2014 г. по теме: «Разработка сети комплексного геофизического мониторинга для прогноза экстремальных природных процессов», универсальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0109.

Цель диссертационной работы и задачи диссертации. Целями данной диссертационной работы являются:

- исследование взаимосвязи нестационарных геоэлектрических процессов в приповерхностной части разреза (на границе тектоносфера-атмосфера) с сильнейшими землетрясениями на глобальном масштабе.
- исследование возможности комплексной интерпретации данных о нестационарных геоэлектрических процессах с данными глобального геофизического мониторинга (сейсмические наблюдения).

Достижение указанной цели требует решения следующих задач исследования:

1. Разработка программно-аппаратных средств для регистрации геоэлектрических процессов в приповерхностной части разреза (на границе тектоносфера-атмосфера) с помощью компактных многоэлектродных измерительных систем (методика Д.А. Кузнецова);

2. Разработка программных средства для хранения, обработки и анализа данных геоэлектрического мониторинга в постоянно-действующем операционном центре, организация архива и открытого доступа к данным геоэлектрического мониторинга;

3. Организация в Евразии международной сети геоэлектрического мониторинга на основе разработанных программно-аппаратных средств;

4. Исследование нестационарных геоэлектрических сигналов, регистрируемых территориально-распределённой сетью геоэлектрического мониторинга, предшествующих сильнейшим землетрясениям с магнитудой $M \geq 8$ на земном шаре, независимо от расстояния от станции мониторинга до эпицентра крупного землетрясения.

5. Исследование когерентностей сигналов, регистрируемых территориально-распределённой сетью геоэлектрического мониторинга – выделения временных интервалов, характерных периодов всплесков синхронного поведения временных рядов.

6. Исследование возможности комплексной интерпретации данных сети геоэлектрического мониторинга с сейсмическими данными японской сети широкополосных сейсмографов F-net.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

- разработан комплекс программно-аппаратных средств, необходимых для организации и функционирования территориально-распределенной сети геоэлектрических измерений, основанных на применении многоэлектродных измерительных систем;

- показано существование нестационарных геоэлектрических процессов (разный характер вариаций как между различными многоэлектродными системами, так и между отдельными электродами, как во временной, так и в частотной области) и выявлено импульсное поведение медианы коэффициента корреляции пар каналов на одной станции геоэлектрических измерений, предшествующее сильному землетрясению;

- накоплена статистика временных изменений нестационарных геоэлектрических процессов и разработан критерий выделения аномалии прогностического признака на сети станций перед сильными землетрясениями с $M \geq 8$, указывающий на глобальный источник регистрируемой геоэлектрической нестационарности на границе тектоносфера-атмосфера;

- установлены временные интервалы и характерные периоды всплесков синхронного поведения геоэлектрических сигналов, регистрируемых на сети многоэлектродных пунктов в Евразии, и временных рядов широкополосных сейсмических станций (сеть F-net на Японских о-вах), проявившийся как глобальный эффект перед мантийным Охотоморским $M8.3$ землетрясением 24 мая 2013 г.

Методы исследования. При разработке аппаратных средств использовались средства моделирования электрических схем. При анализе данных использовались методы статистического анализа, метод главных компонент, корреляционный анализ.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- Программно-аппаратные средства регистрации нестационарных геоэлектрических процессов с помощью многоэлектродной системы, реализующей методику Д.А. Кузнецова, на организованной в Евразии сети мониторинга;

- Эффект резкого поведения медианы коэффициента корреляции пар каналов на одной

многоэлектродной станции геоэлектрических измерений в связи с сильными землетрясениями M7+ в северной части Тихоокеанской плиты в январе 2016 г.;

- Существование нестационарных геоэлектрических сигналов, предшествующих сильным землетрясениям с M8+ на глобальном масштабе.
- Статистически значимый эффект глобальной синхронизации разнородных геофизических данных (геоэлектрические, сейсмические), обнаруженный на временном интервале подготовки мантийного Охотоморского M8.3 землетрясения 24 мая 2013 г.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена использованием калиброванной аппаратуры, строгим математическим аппаратом, достаточным объёмом экспериментальных исследований, накопленных сведений в течение 15 лет и повторяемостью результатов. Фактический материал базируется на непрерывных наблюдениях разности геоэлектрических потенциалов по методике Д.А.Кузнецова в течение 15 лет: в 2001-2007 гг. на одном пункте наблюдений с частотой регистрации 3-6 часов, в 2007-2012 гг. на двух пунктах наблюдений с частотой регистрации 3-6 часов, с 2012 г. по н.в. на 12 станциях международной сети в Евразии с частотой регистрации 1 сек, что подтверждено актами использования результатов диссертационной работы в научно-исследовательских работах и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Практическая ценность работы. Проведённые исследования позволяют:

- обеспечить преемственность технологии измерений с ранее разработанной Д.А. Кузнецовым методикой регистрации геоэлектрических нестационарных сигналов с помощью программно-аппаратного комплекса, реализующего автоматические измерения и обеспечивающего сбор, хранение и обработку данных в постоянно-действующем операционном центре Дистантной Школы «Космо-Метео-Тектоника» (<http://cosmetecor.org/>);

- выполнять дальнейшее расширение сети геоэлектрического мониторинга, осуществляемого по единой методике, путём организации новых пунктов наблюдений с использованием разработанных унифицированных программно-аппаратных средств;

- выполнять исследование физических процессов, сопровождающих подготовку сильных землетрясений на основе многопараметрического подхода (С.А. Пулинец, Д.П. Узунов), концепции сейсмотектогенеза (Л.Н. Дода и др.) и электросетевого подхода (Х.Альфвен) как в ретроспективном, так и в оперативном режиме на основе накопленного непрерывного и пополняемого архива наблюдений на сети станций мониторинга. Результаты работы могут найти применение в профильных институтах геофизического направления.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 26-ой международной школе геофизики (Италия, 2006 г.); Генеральных Ассамблеях Европейского Союза по Геонаукам (EGU, г.Вена, 2008г., 2013 г.); 25-ой и 26-ой Генеральных Ассамблеях Международного геодезического и геофизического союза (IUGG, Мельбурн 2011 г.; Прага, 2015г.); Конференциях Американского Геофизического Союза (AGU Fall meeting, Сан-Франциско, 2011 г., 2015г.); Международной научной конференции «Научная Весна» (Пакистан, г. Исламабад, 2014 г.); Восьмых научных чтениях Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей

(Россия, г.Екатеринбург, 2015 г.); 19-ой международной IEEE-конференции по теории систем, управлению и вычислениям (Румыния, 2015 г.); VIII-ой Международной межвузовской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодые – наукам о земле” - МГРИ-РГГУ (Россия, г.Москва, 2016г.); Международной конференция «Системный анализ данных для изучения природных опасностей» (Россия, Сочи-Роза Хутор, 2016 г.); IV-ой Международной конференции «Современные информационные технологии для научных исследований в области наук о Земле - ITES-2016» (Россия, г.Южно-Сахалинск, 2016 г.); 35-ой Генеральной ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии (Италия, г.Триеста, 2016 г.).

Реализация результатов. Результаты работы применены ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» при выполнении государственного контракта №14.577.21.0109 от 22 сентября 2014 г. ПНИ «Разработка сети комплексного геофизического мониторинга для прогноза экстремальных природных процессов» (шифр 2014-14-579-0057-015) в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы".

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 2 статьи в журналах, включённых ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых изданий, одна работа опубликована главой в книге, входящей в международную систему цитирования Scopus, одна монография. В период с 1999 г. по 2015 г. осуществлялась формализация метода путём депонирования результатов исследований (более 300 депонентов, SPIN-code: 5951-5891 <http://elibrary.ru/>) в ВИНТИ РАН совместно с соавтором метода Д.А. Кузнецовым. В работах, написанных в соавторстве, соисполнителю принадлежит постановка задачи, проведение анализа теоретических, геофизических исследований, организация опытно-методических работ, анализ и обобщение результатов.

Личный вклад автора. Автор по собственной инициативе организовал международное научное исследование и привлёк к его реализации ряд российских и итальянских университетов и организаций. Осуществляемые на 12 станциях Дистантной школы «Космо-Метео-Тектоника» геоэлектрические измерения показали преимущественный технологический приоритет России в развиваемых исследованиях. Реализована аппаратная и программная части единого постоянно действующего центра сбора, обработки и хранения данных. Внедрен автоматизированный способ регистрации нестационарных геоэлектрических процессов на границе тектоносфера-атмосфера, осуществляемый по единой методике. Обнаружены общие закономерности поведения временных рядов, возникающие в качестве локального и глобального эффектов в связи с сильными землетрясениями. Сформулирован алгоритм идентификации сигналов-предвестников, заключающийся в поиске моментов времени, связанных со всплесками коэффициентов парной корреляции между различными каналами станции геоэлектрических измерений.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 источников и двух приложений. Работа изложена на 198 страницах машинописного текста, содержит 151 рисунок и 35 таблиц. Автор выражает благодарность научному руководителю д.физ.-мат. наук А.А. Любушину за большую помощь в подготовке диссертации, друзьям,

коллегам и волонтерам, с которыми проведена часть исследований: Д.А. Кузнецову, Юлианне, С.А. Шопину, А.С. Валову, Александру Ганову, А.А. Шитову, профессору Университета региона Абруццо PhD Франческо Стоппа, Джовани Ецци, Леонардо Николи, семье Терентьевых и многим другим.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приводится краткое содержание работы. Показана актуальность, цели и задачи исследований, применявшиеся методы исследований, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, практическая ценность, реализация результатов и апробация.

Глава 1 «Изучение нестационарных геоэлектрических процессов в приповерхностной части разреза на границе тектоносфера-атмосфера с целью прогноза землетрясений» посвящена обзору и анализу предшествующих работ по регистрации геопотенциалов электрического поля. В главе формулируются задачи исследования.

Раздел 1.1 «Обзор традиционных методов измерения геопотенциалов электрического поля» и раздел 1.2. «Обзор методов электрического зондирования» содержат обзор многолетнего опыта (с конца 19 в.) регистрации вариаций электротеллурического поля (ЭТП) и кажущегося сопротивления для поиска предвестников землетрясений. Связь между вариациями земных токов и землетрясениями изучалась многими учёными, такими как: Абдуллабеков К.Н., Авагимов А.О., Барсуков О.М., Бахметьев П.И., Воробьев А.А., Гохберг М.Б., Гуфельд Н.И., Дубровский В.Г., Мигунов Н.И., Моргунов В.А., Пономарев А.В., Пархоменко Э.И., Соболев Г.А., Троицкая В.А., Уломов Б.И., Чернявский Б.А., а также учёные Японии, Китая, США, Греции и др. Традиционная методика долговременного наблюдения ультранизкочастотного электрического поля (ниже 30 Гц) состоит в использовании измерительной линии с двумя, свинцовыми электродами, заглублёнными в почву на глубину в десятки сантиметров - первые метры, разнесёнными на расстояние в десятки-сотни метров и нескольких километров. Через высокоомное сопротивление и фильтр высокой частоты измеряется разность потенциалов между электродами. Обычно для учета влияния неоднородностей верхней части разреза две взаимноперпендикулярные линии располагают вдоль магнитных меридиана и параллели. Так как источник аномального сигнала неизвестен, а также ввиду того, что общепринятым является представление о том, что при подготовке землетрясений создаются региональные электрические поля, то расстояния между электродами стараются делать как можно больше с целью увеличения величины полезного сигнала. С учетом опыта измерений разностей электротеллурических потенциалов, организованных Г.А.Соболевым, на Камчатке применяется методика Д.А. Кузнецова. Разности геоэлектрических потенциалов измеряются на парах электродов, расположенных в близкорасположенных шурфах (см. рисунок 1). Измерительные линии ориентированы в субгоризонтальном (юго-запад – северо-восток) направлении и с общим проводом на базе не более 10 м.

Результаты применения методики VAN (Варотсос – Алексопоулос – Номикос) в Греции с 1980 г., в Японии с 1987 г., а также однотипных методик регистрации разностей электротеллурических потенциалов в ряде стран показали наличие корреляции аномальных сейсмоэлектрических сигналов перед многими сильными землетрясениями.

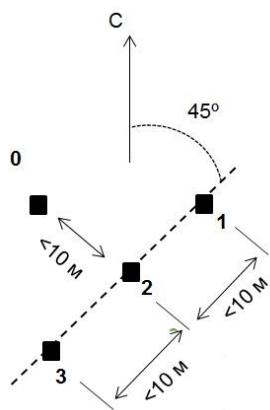


Рисунок 1 – Система наблюдения разностей геоэлектрических потенциалов на типовой станции: 1 – северо-восточный шурф; 2 – центральный шурф; 3 – юго-западный шурф, 0 – отдельный нулевой провод

На геофизических полигонах Таджикистана, Туркмении, Киргизии, Китая и других стран были организованы наблюдения за вариациями кажущегося сопротивления методами дипольного и вертикального электрического зондирования (ДЭЗ, ВЭЗ), а также с использованием специального сильноточного источника. В Китае накопленный архив измерений кажущегося сопротивления насчитывает почти 40 лет непрерывных наблюдений на установке вертикального электрического зондирования с длиной питающей линии от 100 м до 3000 м. Результаты анализа данных по предвестникам электрического сопротивления горных пород остаются дискуссионными. Организация непрерывных наблюдений ДЭЗ имеет определённые трудности, так как требует использования мощных источников тока. В случае ВЭЗ имеет тенденция влияния метеорологических факторов и сезонного хода.

В разделе 1.3 «Обоснование и постановка задач исследования» проанализирован опыт наблюдения за сейсмоэлектрическими предвестниками землетрясений. Установлен несогласованный характер вариаций разностей электротеллурических потенциалов, их мозаичность распространения: аномальные сигналы наблюдаются, но регистрируются не на всех измерительных линиях одной станции; аномальные сигналы появляются несинхронно на разных измерительных линиях; отсутствуют синхронные сигналы на региональной сети. Как показывает опыт, подобная избирательность регистрируемых разностей электротеллурических потенциалов приводят к большому числу ложных тревог. Отмечается трудоёмкость задачи выделения аномалии в поведении теллурических потенциалов, обусловленных внутриземными источниками, и отличие их от внешних источников электрических процессов, протекающих в ионосфере и магнитосфере. Несмотря на то, что аномалии поведения электротеллурических потенциалов перед землетрясениями обсуждаются уже более 100 лет, до сих пор нет согласия среди геофизиков относительно возможности обнаружить такие сигналы на фоне помех. Проводимые региональные исследовательские работы по регистрации вариаций ЭТП не имели своего продолжения в виде организации непрерывного систематического мониторинга в разных пунктах, разнесённых на большие расстояния. Обнаружено, что принципиально отличающаяся схема регистрации, разработанная Д.А. Кузнецовым, позволяет исключить (или как минимум, значительно уменьшить) трудноучитываемые и трудно-контролируемые факторы, которые могут иметь место в ранее применявшихся методах с однонаправленными или разнонаправленными линиями, и, таким образом, начать изучение нестационарных геоэлектрических сигналов, измеренных на компактной много-электродной измерительной системе. В результате анализа применявшихся методов установлено,

что остаётся неясным источник аномалии геоэлектрических сигналов: локальный в очаге землетрясения, локальный в месте измерения, региональный, или связан с единым глубинным источником в масштабах планеты? В этой связи первостепенным становится организация непрерывного систематического геоэлектрического мониторинга в пунктах, разнесённых на большие расстояния, осуществляемого по единой методике на единой аппаратной основе. Организация сети мониторинга на основе методов регистрации ЭТП представляется малоперспективным и дорогостоящим мероприятием, поэтому автор применил методику Д.А.Кузнецова в силу своей дешевизны с целью синхронной регистрации нестационарных геоэлектрических процессов в других удалённых регионах Земли (в том числе сейсмоопасных) с последующим совместным анализом с данными сети сейсмического мониторинга. Мониторинг распределённого глобального сейсмoresурса (М.Бот) на международной сети многоэлектродных станций путём регистрации нестационарных геоэлектрических процессов в приповерхностной части разреза (на границе тектоносфера-атмосфера) перед сильными катастрофическими землетрясениями позволит наработать статистику для проведения обоснованных оценок, как часто процессы подготовки землетрясения связаны с появлением аномальных геоэлектрических сигналов в пункте, отстоящем от очага будущего землетрясения на десятки-сотни и тысячи километров.

В главе 2 «Информационно-измерительная система сети геоэлектрических измерений» разработана аппаратно-программная база для регистрации по методике Д.А.Кузнецова кратковременных контрастных геоэлектрических сигналов, отличающиеся по величине амплитуды более чем в 2.7...3.14 раза от фона (рисунки 2, 3).

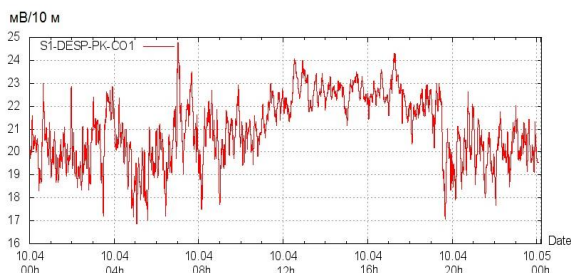


Рисунок 2 – Суточная (04.10.2016 г.) вариация разностей потенциалов, переменная составляющая в канале Ц01 на станции С1-ШЭП-Камчатка

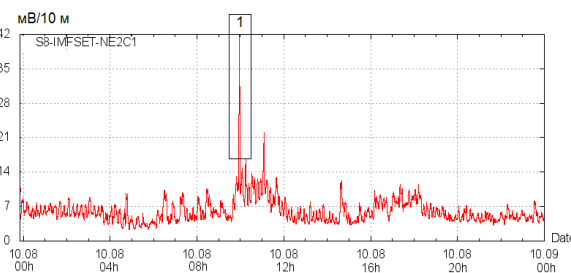


Рисунок 3 – Суточная (08.10.2016 г.) вариация разностей потенциалов, переменная составляющая в канале СВ2Ц1 на станции С8-ИМФЭТ-Крым, где №1 обозначает момент контрастного всплеска

В разделе 2.1. «Сеть станций геоэлектрических измерений» приведены сведения о сети измерительных пунктов синхронной регистрации нестационарных геоэлектрических процессов в Евразии, организованной автором в инициативном порядке. В настоящий момент функционируют 12 пунктов измерения разностей геоэлектрических потенциалов в приповерхностной части разреза, параметры которых представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Сеть многоэлектродных станций: 1 – группа из 6 станций в районе г.Петропавловск-Камчатский и г. Елизово, 2 – пос.Эссо, 3 – г.Горно-Алтайск, 4 – Крым, 5 – 2 станции в районе г.Къети, 6 – г.Ефремов, 7 – г.Тула

Автоматический ввод ежесекундных измерений в компьютер выполняется в частотном диапазоне 0.01–4000 Гц с помощью многоканального сертифицированного измерительного USB-модуля E14-140M (ООО Л-Кард, Россия, сертификат No. 38403 от 2010/03/03), внесённого в Государственный реестр средств измерений (No.43195-09).

Станции работают в автономном режиме и осуществляют передачу данных на центральный сервер, доступный в Интернет по адресу <http://cosmetecor.org/>. Данные доступны в виде текстовых файлов по адресу <ftp://cosmetecor.org> Автоматические измерения проводятся в формате UT-времени.

В разделе 2.2. «Организация обработки нестационарных геоэлектрических сигналов на границе тектоносфера-атмосфера» разработана схема информационно-измерительной системы, состоящей из модуля сбора данных и сервера для приема, анализа и хранения данных. В качестве аппаратуры ввода данных в компьютер (рисунок 5) выбран сертифицированный USB-модуль E14-140M (ООО «ЛКард»).



Рисунок 5 – Измерительный блок на базе E14-140M (16 каналов)

Расчёт постоянной и переменной составляющей выполняется программно (рисунок 6). Постоянная составляющая вычисляется путем применения к исходному сигналу фильтра нижних частот (ФНЧ) (БИХ-фильтр, 6-й порядок, частота среза 10.0 МГц) и последующей децимацией до частоты дискретизации 1 Гц. Переменная составляющая вычисляется путем последовательного применения фильтра верхних частот (ФВЧ) (БИХ-фильтр, 6-й порядок, частота среза 4 Гц), выпрямления полученного сигнала и последующего применения ФНЧ (БИХ-фильтр, 6-й порядок, частота среза 10 МГц). В качестве фильтров используются цифровые фильтры Бесселя.



Рисунок 6 – Схема обработки сигналов

Схема обработки постоянной и переменной составляющей (рисунок 6) осуществляется аналогично измерениям постоянного и переменного тока с помощью мультиметра и была выбрана для обеспечения сопоставимости результатов со старыми измерениями, которые с 2001 г. по 2012 г. выполнялись на Камчатке, что необходимо для калибровки аппаратуры в целом. Программное обеспечение для аппаратуры регистрации нестационарных геоэлектрических сигналов позволяет использовать как классические БИХ-фильтры, так и каскад биквадратных фильтров.

Параметры цифровых фильтров – порядок фильтра и (коэффициенты передаточной функции) загружаются из файла. В зависимости от числа входных каналов измерительный модуль может настраиваться на частоту дискретизации 12.5 кГц (16 каналов) или 14к Гц (14 каналов). Для обеих частот дискретизации выполнен синтез цифровых фильтров, обеспечивающих реализацию схемы обработки, показанной на рисунке 6, с одинаковыми частотными характеристиками.

ми. Всего было синтезировано два ФНЧ и два ФВЧ в биквадратных структурах.

В разделе 2.3. «Программная часть постоянно-действующего операционного центра сети геоэлектрических измерений и графическое представление данных» разработана схема информационного взаимодействия (рисунок 7) операционного центра, работающего под управлением операционной системы Ubuntu (Debian GNU/Linux) и СУБД MySQL. Программное обеспечение (ПО) для ввода, хранения, графического представления, выборки данных и анализа данных геоэлектрических измерений и комплекса геофизических наблюдений разработано в виде комплекта скриптов на языке Ruby, выполняемых на центральном сервере.

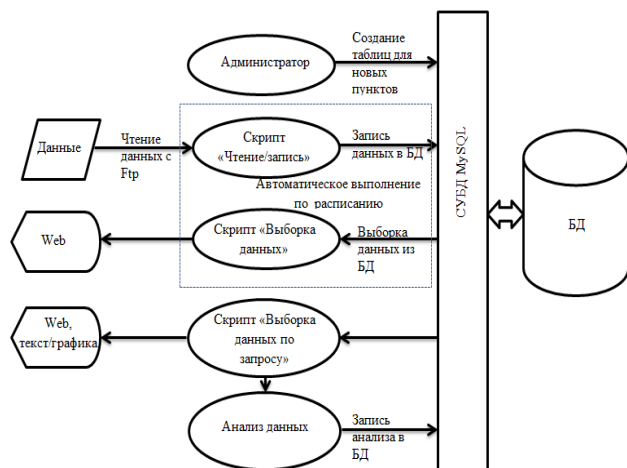


Рисунок 7 – Схема информационного взаимодействия операционного центра

Разработан интернет-сайт, обеспечивающий свободный доступ к графикам через web-интерфейс [<http://cosmetecor.org>]. На сервере реализовано ПО предварительной обработки временных рядов многоэлектродных станций для последующего анализа методом агрегированных сигналов, методика которой рассмотрена в Главе 4. Обработка временных рядов проводится по следующим алгоритмам, выполняемых скриптами: вычисление среднего для каждого часа; сглаживание (винзоризация); селекция каналов по коэффициенту корреляции (более 0.9 по модулю).

В разделе 2.4 «Геоэлектрические измерения в 2001-2016гг. на Камчатке» обзорно представлены результаты формулирования краткосрочного регионального на Камчатке прогноза сильного с магнитудой M7+ землетрясения зимой-весной 2006г., а также краткосрочного регионального на Камчатке прогноза сильного с магнитудой M7+ землетрясения зимой-весной 2016г. на основе геоэлектрических измерений. На рисунках 8, 9 представлены краткосрочный и оперативный предвестники, распознанные в рядах геоэлектрических измерений перед Олюторским землетрясением 20.04.2006 г. с M7.6. На рисунках 10, 11 представлены краткосрочный и оперативный предвестники, распознанные в рядах геоэлектрических измерений перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с M7.2.

В главе 3 «Исследование нестационарных геоэлектрических сигналов в связи с сейсмичностью» проводится исследование временных рядов многоэлектродных систем, которые определяются следующими параметрами:

- а) представляют собой результаты измерений процесса одной физической природы, регистрируемых сертифицированным однотипными приборами;
- б) регистрируются по единой методике;
- в) пункты наблюдения расположены в удалённых местах северного полушария – п-ов Кам-

чатка, горный Алтай, Чёрное море (п-ов Крым), Италия.

г) нестационарные геоэлектрические сигналы отбираются в соответствии с критерием выделения аномалии прогностического признака.

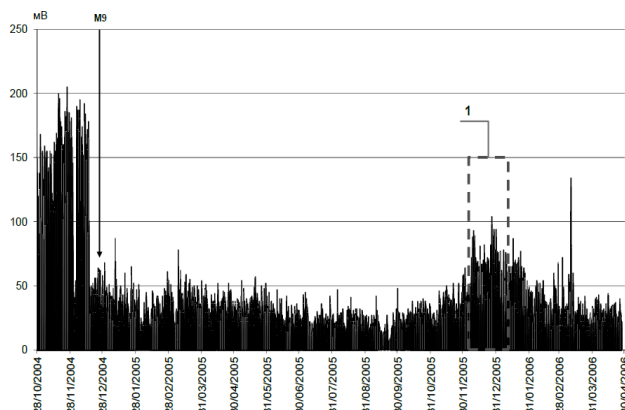


Рисунок 8 – Данные станции С1-ШЭП, канал СВ, перем. составляющая за период 28.10.2004-30.04.2006г.: М9 – цунамигенное землетрясение в Индонезии 26 декабря 2004 г. с М9; 1 – аномалия-краткосрочный предвестник

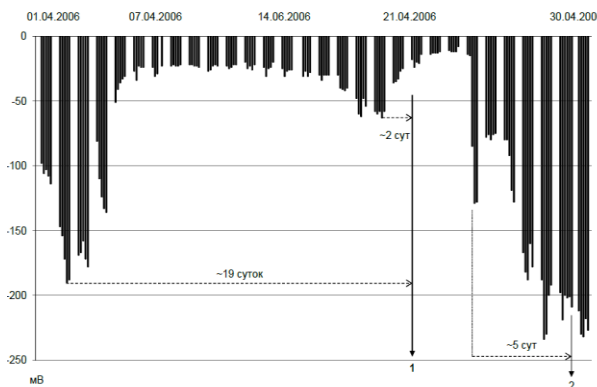


Рисунок 9 – Данные станции С1-ШЭП, канал Ю356, пост. составляющая за период 01.04.2006-30.04.2006г.: 1 – землетрясение в Корьякии 20 апреля 2006 г. с М7.6; 2 – афтершок 30 апреля 2006г. с М6.4

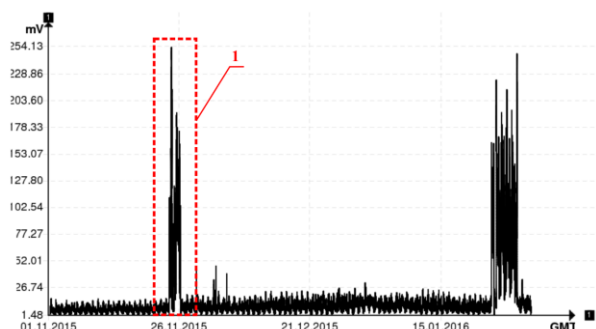


Рисунок 10 – Данные станции С1-ШЭП-ПК, канал Ю312, перем. составляющая за период 01.11.2015-01.02.2016г.: 1 – аномалия-краткосрочный предвестник

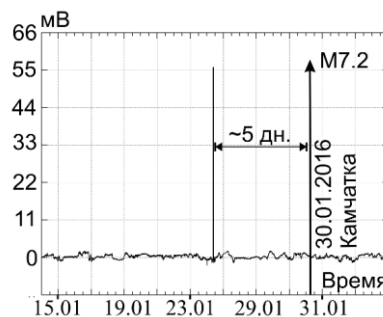
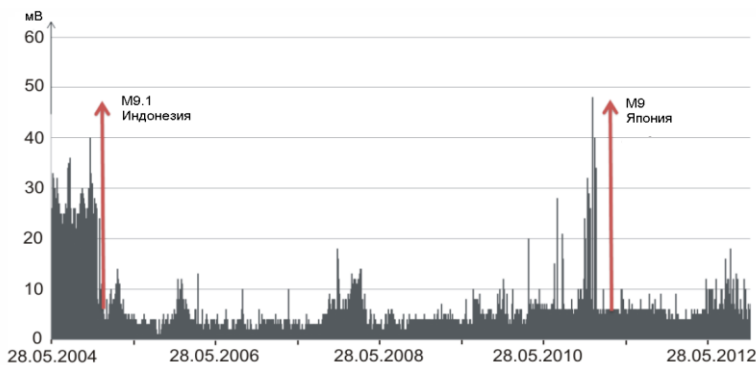


Рисунок 11 – Пример сигналов на оперативном интервале упреждения Жупановского землетрясения 30 января 2016г. с М7.2 (станция С1-ШЭП-ЮЗ в ПК, канал Ю312, перем. составляющая)

Первичный анализ связей между нестационарной геоэлектрической активностью и сейсмичностью был начат с селекции мирового каталога. На рисунке 12 нанесены данные измерений разности геоэлектрических потенциалов, переменная составляющая, полученные в канале Ю356 станции С1-ШЭП-ПК в течение 8 лет непрерывных измерений.



Анализ рисунка 12 обнаружил, что интервал 28.05.2004-02.12.2012 гг. можно разделить на

Рисунок 12 – Разности геоэлектрических потенциалов, переменная составляющая, в канале Ю356 станции С1-ШЭП 28.05.2004-02.12.2012 гг. и цунамигенные землетрясения в Индонезии и Японии

две неравные части, резко отличающиеся друг от друга. Первая часть занимает интервал от 06.04.2001 г. (начало геоэлектрических измерений в Петропавловске-Камчатском) до 15.12.2004 г. За эти почти четыре года произошли всего лишь два сильнейших землетрясения с $M \geq 8$. В течение второй части менее чем за три года произошло девять сильнейших землетрясений с $M \geq 8$. Индикатором раздела служит гигантское цунамигенное землетрясение в Индонезии с $M 9.1$ (см. №1 таблица 1), за 10 суток до которого наблюдалось скачкообразное уменьшение значений наибольших ежесуточных значений в канале Ю356 станции С1-ШЭП (см рисунок 12). При этом за четыре месяца перед цунамигенным землетрясением в Японии с $M 9$ (см. №2 таблица 1) наблюдалось кратковременное возвращение наибольших ежесуточных значений в канале Ю356 до прежнего уровня (см рисунок 12).

Таблица 1 – Землетрясения с магнитудой $M \geq 9$, произошедшие с 2001г. по 2015 г.

№ п/п	Дата, Время (UT)	Широта, град	Долгота, град	Глубина, км	M	Место
1	26.12.2004 00:58:53	3.295 с.ш.	95.982 в.д.	30	9.1	Суматра, Индонезия
2	11.03.2011 05:46:24	38.297 с.ш.	142.373 в.д.	29	9	Хонсю, Япония

В разделе 3.1. «Исследование поведения медианы парного коэффициента корреляций многоэлектродной системы на примере двух сильных землетрясений М7.1 24 января 2016 и М7.2 30 января 2016, произошедшие в северной части Тихоокеанской плиты» анализируется новый геофизический эффект, обнаруживаемый на измерительной установке. Поскольку данные регистрируются на одной измерительной станции в одной геологической структуре, то следует ожидать, что коэффициент корреляции пар каналов будет превышать значения 0,9. Было проведено исследование с целью проверки предположения, что будет наблюдаться резкое поведение медианы коэффициента корреляции пар каналов в связи с сильными землетрясениями. Предварительно проанализированы графики данных временных рядов в каналах шурфа Ю3 станции С1-ШЭП, при котором обнаружены контрастные сигналы на интервале оперативного упреждения двух сильных землетрясений М7.1 24 января 2016 и М7.2 30 января 2016, произошедшие в северной части Тихоокеанской плиты. Проведен сравнительный анализ со среднечасовыми значениями разностей теллурических потенциалов в пунктах п.Паратунка, п. Шипунский и п. Тундровый (п-ов Камчатка, КФ ГС РАН, <http://www.emsd.ru/lgi/observations>) и сделан вывод об отсутствии видимых контрастных сигналов. После чего произведен расчет парных коэффициентов корреляции каналов и их медианы на одной станции геоэлектрических измерений С1-ШЭП-ПК. Было обнаружено резкое поведение медианы парных коэффициентов корреляции $med \xi$ каналов, которые совпадают с моментом землетрясения М7.1-Аляска 24 января 2016 г. и опережают на сутки землетрясение М7.2-Камчатка 30 января 2016 г. Результаты расчётов приведены на рисунке 13. Расчёты производились с 01 января по 3 февраля 2016г. в скользящем временном окне длиной 86400 отсчетов (1 сутки) со смещением окон 21600 отсчетов (6 часов). Дополнительная оценка коэффициентов корреляции $med \xi_w$ после процедуры винзоризации, то есть итеративной срезки выбросов, и применения робастного метода $med \rho$, где использование медиан делает результат нечувствительным к выбросам, показала, что резкое поведение коэффициента корреляции не является артефактом выброса.

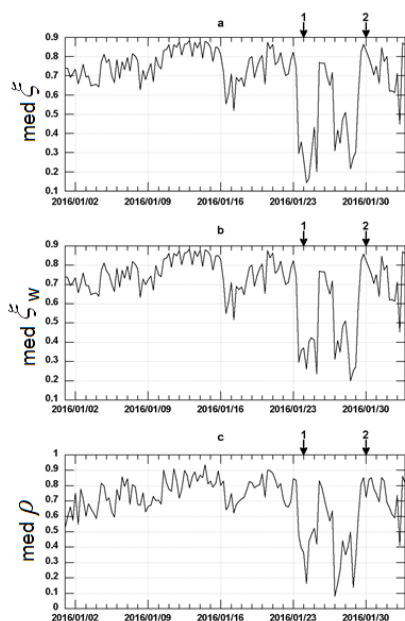


Рисунок 13 – Медиана парного линейного коэффициента корреляции $med \xi$ (а), медиана парного линейного коэффициента корреляции после винзоризации – $med \xi_w$ (б), медиана робастного коэффициента корреляции Хьюбера - $med \rho$ (с). Цифрами 1 и 2 отображены моменты сильных землетрясений М7.1-Аляска 24 января 2016 г. (на расстоянии ~ 3000 км от Петропавловска-Камчатского и станции С1-ШЭП-ПК) и М7.2-Камчатка 30 января 2016 г. (на расстоянии ~ 110 км от Петропавловска-Камчатского и станции С1-ШЭП-ПК)

В разделе 3.1 сформулирован алгоритм идентификации сигналов-предвестников, заключающийся в поиске моментов времени, связанных со всплесками коэффициентов парной корреляции между различными каналами станции геоэлектрических измерений:

1. задание начальной и конечной даты временного интервала идентификации;
2. для каждой i -й даты внутри заданного интервала
 - 2.1. для каждой пары j, k каналов многоэлектродной станции
 - 2.2. рассчитываем линейный коэффициент парной корреляции по формуле:

$$R_{ab}^i = \frac{cov_{ab}}{\sigma_a \sigma_b},$$

где a, b – суточный фрагмент сигналов двух рассматриваемых каналов j и k , cov_{ab} – ковариация суточных фрагментов сигналов двух рассматриваемых каналов, σ_a, σ_b – среднеквадратические отклонения суточных фрагментов сигналов двух рассматриваемых каналов, i – номер даты внутри рассматриваемого интервала.

Если $|R_{ab}^i - R_{ab}^{i-1}| \leq \varepsilon$, где R_{ab}^i и R_{ab}^{i-1} – коэффициенты корреляции каналов на соседних суточных интервалах, ε – пороговая величина, $|\varepsilon| \leq 1$, то на интервале i для каналов a и b наблюдается нестационарный сигнал-предвестник.

Очевидно, что величина порогового значения – величина ε должна быть подобрана ретроспективным анализом и должна уточняться в дальнейшем.

В разделе 3.2 «Исследование нестационарных геоэлектрических сигналов в евразийской сети мониторинга в связи с сильными землетрясениями с $M \geq 8$ в 2001-2015 гг.» представлены результаты анализа многолетнего архива данных, накопленного на международной сети геоэлектрических измерений в северном полушарии на территории, охватывающей Евразийскую часть земной коры с координатами по широте от 42°C до 56°C и долготе от 14°B до 159°B . Этот анализ позволил установить характерные особенности сигналов: а) нестационарные кратковременные (от нескольких десятков минут до нескольких часов) знакопеременные или однополярные сигналы или последовательности сигналов, отличающиеся по величине амплитуды бо-

лее чем в 2.7...3.14 раза от фона; б) регистрируются на интервале оперативного предупреждения 30 суток сильных землетрясений $M \geq 8$ независимо от расстояния от эпицентра до пункта геоэлектрического мониторинга. На рисунках 14-19 представлены примеры нестационарных геоэлектрических предвестников, наблюдавшихся на 30 суточном оперативном интервале предупреждения в связи с землетрясениями с магнитудой $M \geq 8$ на земном шаре, произошедших с 2001 по 2015 гг. С 2001 по 2007 гг. накопление данных производилось на одной многоэлектродной станции С1-ШЭП в Петропавловске-Камчатском. Интервал измерений составлял от 3 до 6 часов. В 2007 г. был добавлен пункт геоэлектрических измерений С2-ИМФПЭТ в Петропавловске-Камчатском. В 2012 г. был начат 1 сек. мониторинг на сети геоэлектрических измерений.

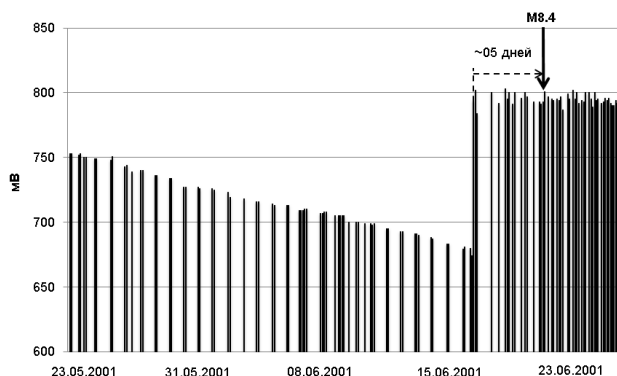


Рисунок 14 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса перед землетрясением М8.4 Перу, 23 июня 2001г., на регистрограмме всех значений разности потенциалов, постоянная составляющая в канале СВ станции С1-ШЭП-ПК, измеренные с 23 мая по 27 июня 2001 г.

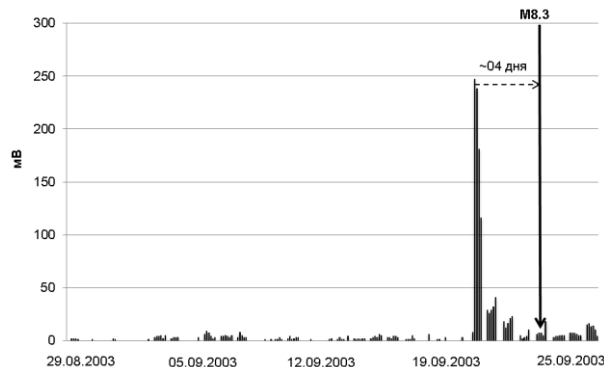


Рисунок 15 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса перед землетрясением М8.3, Япония, 25 сентября 2003г., на регистрограмме всех значений разности потенциалов, постоянная составляющая в канале Ц34 станции С1-ШЭП-ПК, измеренные с 29 августа по 28 сентября 2003 г.

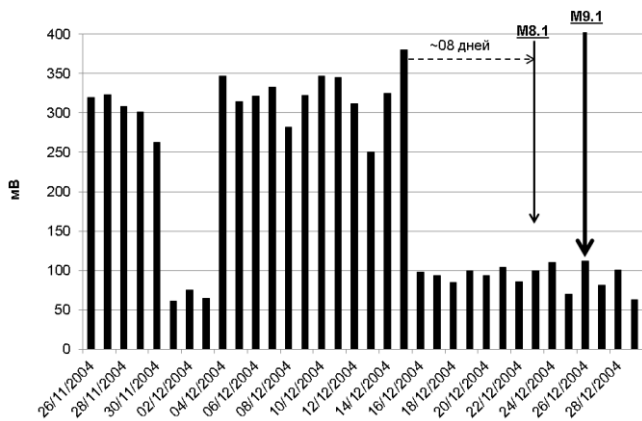


Рисунок 16 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса в связи с землетрясением М8.1 Маккуори, Австралия, 23 декабря 2004г. и цунамигенным землетрясением М9.1 Индонезия, 26 декабря 2004г., на регистрограмме ежесуточных наибольших значений амплитуды разности потенциалов, переменная составляющая в канале СВ станции С1-ШЭП, измеренные с 26 ноября по 29 декабря 2004 г.

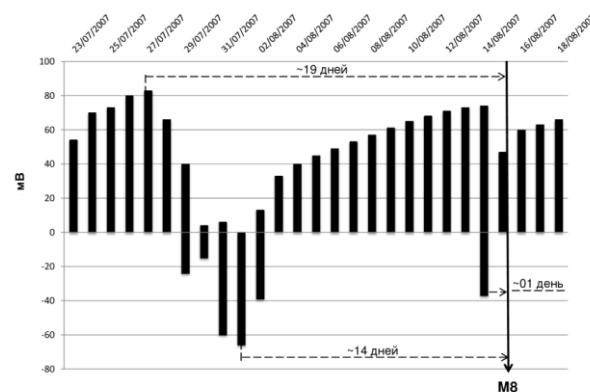


Рисунок 17 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса в связи с землетрясением М8 Перу 15 августа 2007г. на регистрограмме ежесуточных максимальных значений разности потенциалов, постоянная составляющая в канале Ю323 станции С1-ШЭП-ПК, измеренные с 15 июля по 18 августа 2007г.

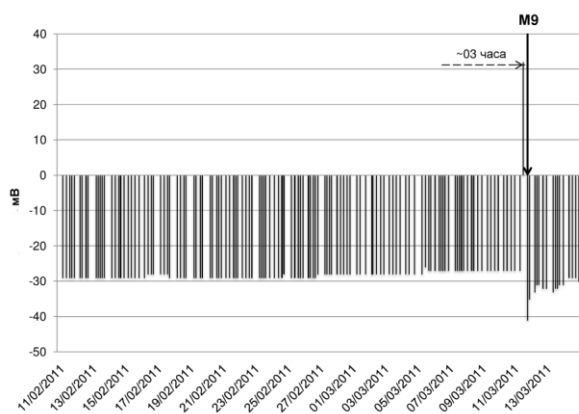


Рисунок 18 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса в связи с землетрясением М9 Хонсю, Япония 11 марта 2011г. на регистрограмме ежесуточных всех значений разности потенциалов, постоянная составляющая в канале СВ12 станции С2-ИМФПЭТ-ПК, измеренные с 11 февраля по 14 марта 2011г.

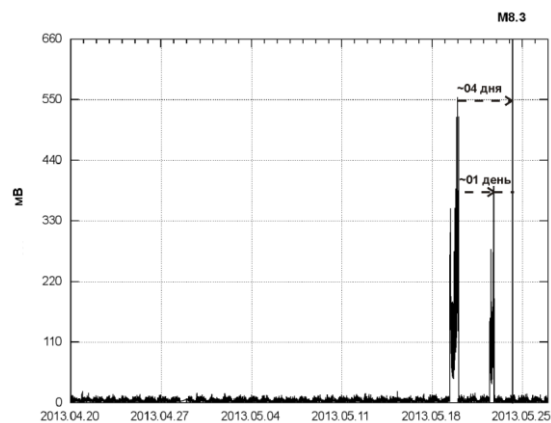


Рисунок 19 – Пример нестационарного геоэлектрического процесса в связи с землетрясением М8.3 Охотское море 24 мая 2013г. на регистрограмме всех значений разности потенциалов, переменная составляющая в канале СВ23 станции С2-ИМФПЭТ-ПК, измеренные с 20 апреля по 27 мая 2013г.

Считается, что прогностическая ценность любых геофизических наблюдений является априорно неочевидной – это показывает практика прогноза землетрясений. Прогностическая ценность наблюдений становится очевидной лишь после достаточно углублённой их обработки (А.А. Любушин). Поэтому в главе 4 предлагается методика для такого углублённого анализа многомерных наблюдений. В частности, пользуясь результатами численных расчетов Фурье-агрегированных сигналов и спектральных мер когерентного поведения многомерных временных рядов сети геоэлектрических измерений Дистантной школы «Космо-Метео-Тектоника» и японской сети широкополосных сейсмических станций F-net, оцениваемых в скользящих временных окнах, мы смогли провести совместный анализ для интервала 2012-2015 гг. В результате анализа, выполненного совместно с доктором физ.-мат. наук А.А. Любушиным, выделен ряд значимых всплесков когерентного поведения разнородных данных в рассмотренном ряду наблюдений, часть из которых предположительно связана с сильнейшим М8.3 мантийным Охотоморским землетрясением 24.05.2013г.

В разделе 4.1 «Методика анализа результатов измерений как многомерных временных рядов» сформулирована методика, заключающаяся в следующем:

- 1) предварительная обработка данных: переход к временному шагу 1 час путём усреднения и децимации исходных сигналов;
- 2) предварительная селекция наблюдений: для каждой станции геоэлектрических измерений, имеющей многоканальные записи из обработки исключаются каналы, имеющие высокие значения модуля коэффициента парной корреляции;
- 3) для каждой многоканальной станции для каналов, принятых к обработке, вычисляются стационарные Фурье-агрегированные сигналы;
- 4) для станций, относящихся к одной и той же области, например, Камчатка, или образующих компактную группу станций, например, Петропавловск-Камчатский, или сети станций геоэлектрических измерений, вычисляется агрегированный сигнал 2-го порядка;
- 5) производится анализ эволюции множественных спектров когерентности в скользящих

временных окнах между стационарными агрегированными сигналами и агрегированными сигналами 2-го порядка для выделения частотных полос и временных интервалов всплеска меры синхронизации между разнородными данными.

б) при наличии наблюдений по достаточно густым сетям наблюдений агрегированный сигнал можно заменить на медиану значений геофизических данных, предварительно оценённых в коротких временных интервалах.

Разработанная методика использована для совместного анализа данных геоэлектрических измерений, а также данных сейсмического мониторинга F-net (Япония).

В разделе 4.2 «Временные ряды мониторинга нестационарных электрических сигналов» применена методика и вычислено представление агрегированного сигнала 2-го порядка для различного числа одновременно работающих многоэлектродных станций в сети геоэлектрических измерений.

На рисунке 20 сверху вниз показаны графики Фурье-агрегированного сигнала второго порядка для 3 станций, 4 станций, 5 станций, 6 станций, 7 станций. Они все меньше и меньше по горизонтальной оси, потому что начало измерений для каждой станции разное, но конец интервала для всех одинаков. Затем был выбран сигнал, в котором выделены наиболее общие характеристики – им оказался Фурье-агрегированный сигнал второго порядка для пяти станций (третий сверху на рисунке 20с).

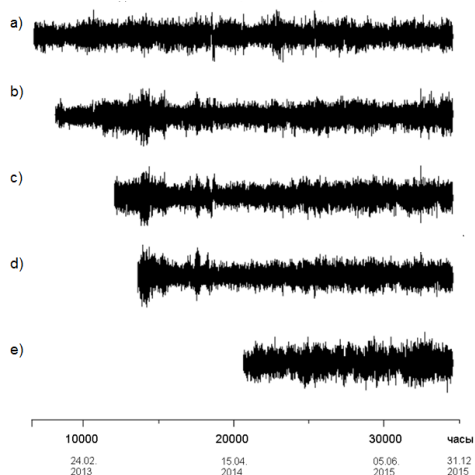


Рисунок 20 – Графики Фурье-агрегированных сигналов 2-го порядка для различных комбинаций станций на Камчатке. Время, часы от начала 2012 года. а) 3 станции: С1-ШЭП, С2, С4-Эссо; б) 4 станции: С1-ШЭП, С1-ШЭП(ЮЗ), С2, С4-Эссо; в) 5 станций: С1-ШЭП, С1-ШЭП(ЮЗ), С2, С3, С4-Эссо, С7; г) 6 станций: С1-ШЭП, С1-ШЭП(ЮЗ), С2, С3, С4-Эссо, С7; е) 7 станций: С1-ШЭП, С1-ШЭП(ЮЗ), С1, С2, С3, С4-Эссо, С7

На рисунке 21 представлены спектрально-временные диаграммы эволюции логарифма спектров мощности агрегированных сигналов 2-го порядка от 3-х и 6-ти станций на Камчатке. Цель вычисления спектра мощности показать, что увеличение числа станций, включенных в процесс агрегации 2-го порядка для станций на Камчатке несущественно влияет на спектральную структуру агрегированного сигнала.

Определены множественные коэффициенты когерентности между агрегированными сигналами станций на Алтае, в Италии и агрегированными сигналами 2-го порядка от различных комбинаций станций на Камчатке. На рисунках 22а-22д представлены частотно-временные диаграммы эволюции спектральной меры когерентности: на рисунке 22а – попарного квадратичного коэффициента когерентности, а на рисунках 22б-22д – множественных коэффициентов когерентности между агрегированными сигналами станций на Алтае, в Италии и агрегированными сигналами 2-го порядка от различных комбинаций станций на Камчатке. Оценки производились в

скользящем временном окне длиной 672 часа или 28 суток (солнечно-лунный месяц) со смещением окон 24 часа.

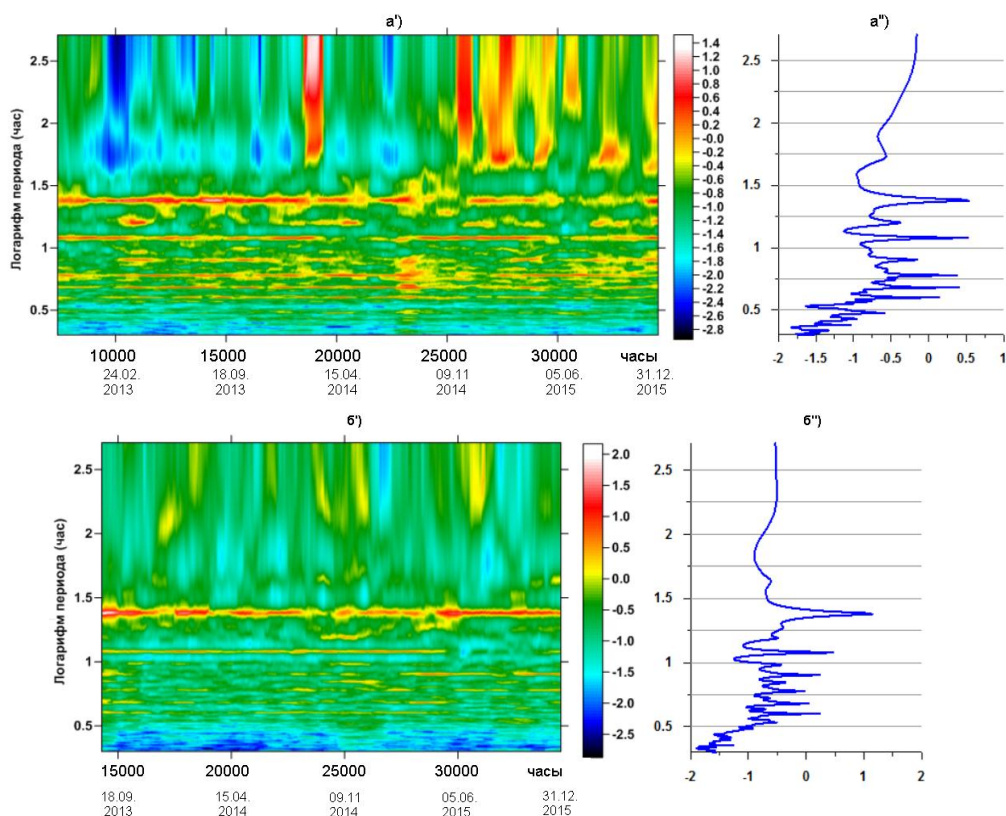


Рисунок 21 – Спектрально-временные диаграммы эволюции логарифма спектров мощности Фурье-агрегированных сигналов 2-го порядка для 3-х (а') и 6-ти (б') станций на Камчатке. Время, часы от начала 2012 года, правый конец скользящего временного окна длиной 672 часа со смещением 24 часа; а'' и б'' – графики соответствующих усреднённых спектров от всех окон

В результате обнаружился очень существенный всплеск когерентности в одном временном интервале 12000-16000 часов от начала 2012 года и на одних и тех же периодах около 24 часов. Обращает внимание тот факт, что коллективное поведение временных рядов сохранялось при исследовании множественных коэффициентов когерентности между агрегированными сигналами станций на Алтае, в Италии и агрегированными сигналами 2-го порядка от различных комбинаций станций на Камчатке. Видно из рисунков, что процесс начался примерно за 1.5 месяца до мантийного Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г., захватывает его и продолжается до сентября 2013г. Мы интерпретируем этот всплеск когерентности, наблюдавшийся на сети геоэлектрических измерений в северном полушарии, как отклик на подготовку Охотоморского землетрясения, которое ощущалось на евразийском континенте. Так как геоэлектрические измерения осуществляются на малой базе (менее 10 метров) мы интерпретируем глобальный эффект как следствие того, что глобальные процессы, происходящие далеко от пункта регистрации, тем не менее очень слабо меняют свойства регистрируемых геоэлектрических сигналов в пункте измерения. Эти слабые изменения могут быть вызваны, например, пьезоэлектрическим эффектом или электро-химическими процессами. Если рассматривать измерения в каждом пункте, то мощные индивидуальные помехи мешают выделить эти слабые предвестниковые изменения. Однако

при совместной многомерной обработке измерений от нескольких пунктов предвестниковые сигналы могут быть выделены, поскольку они являются синхронными (коррелированными, когерентными) в каждом пункте регистрации, а индивидуальные помехи могут быть подавлены, так как они в разных пунктах некогерентны.

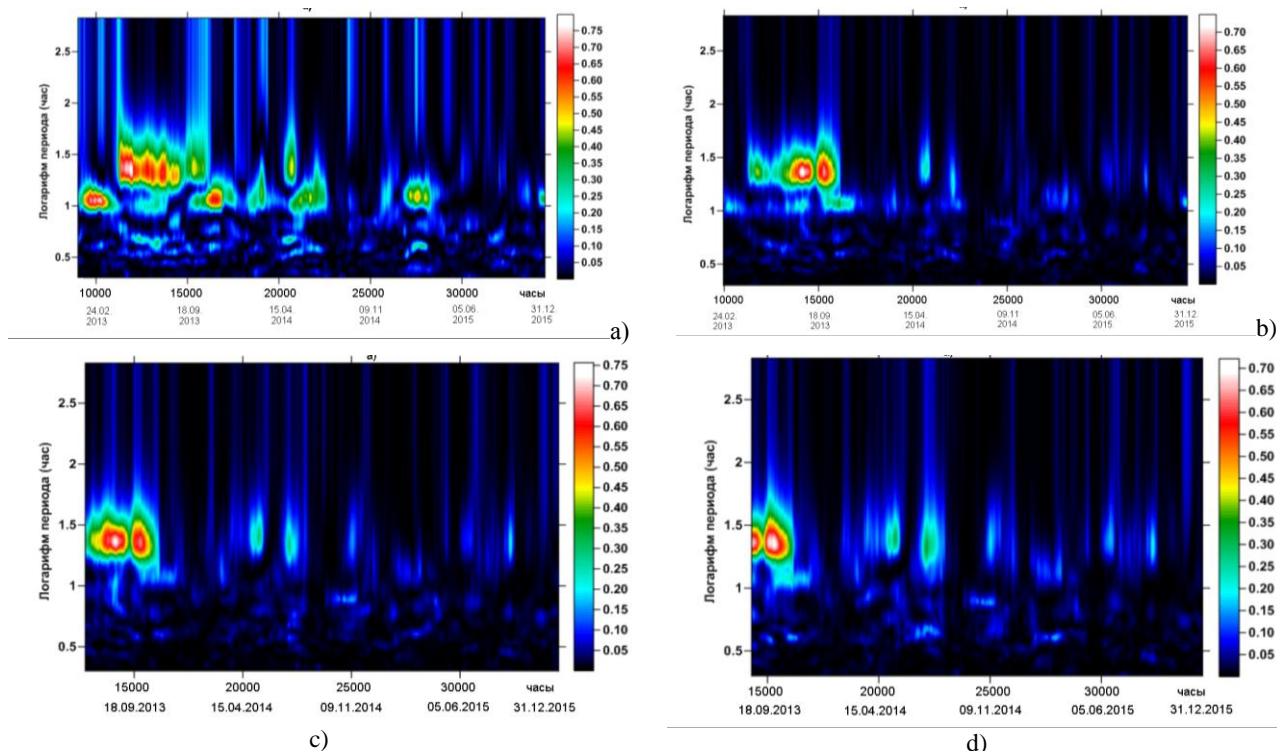


Рисунок 22 – Частотно-временные диаграммы эволюции спектральной меры когерентности: а) между агрегированным сигналом станции С5-Алтай и агрегированным сигналом 2-го порядка для 4-х станций на Камчатке (рисунок 20b); б) между агрегированными сигналами станций С5-Алтай и С6-Къети и агрегированным сигналом 2-го порядка от 4-х станций на Камчатке. (рисунок 20b); в) между агрегированными сигналами станций С5-Алтай и С6-Къети и агрегированным сигналом 2-го порядка от 5 станций на Камчатке (рисунок 20c); д) между агрегированными сигналами станций С5-Алтай и С6-Къети и агрегированным сигналом 2-го порядка от 6 станций на Камчатке (рисунок 20d)

В разделе 4.3 «Исследование связи нестационарных геоэлектрических сигналов на Камчатке с вариациями параметров сейсмических шумов на Японских островах» проведено исследование эффектов когерентности между измерениями нестационарных геоэлектрических сигналов на Камчатке в течение 2013-2015 гг. и вариациями данных сейсмических шумов на Японских островах за тот же период. Результаты такого анализа представлены на рисунке 23, где изображена частотно-временная диаграмма эволюции квадрата спектра когерентности между этими 2-мя агрегированными сигналами, вычисленная в скользящем временном окне длиной 90 суток.

На ней видны 5 всплесков когерентности с постепенно увеличивающимся характерным периодом. Интересно отметить, что первый всплеск для положений правого конца временного окна 120-150 дней от 12.12.2012 и характерным периодом около 4 суток приходится на интервал времени перед мантийным Охотоморским землетрясением 24 мая 2013 года (163 день от 12.12.2012). Периоды последующих 4-х всплесков примерно равны: 4, 6, 10-16 и 30-90 суткам, то

есть синхронизация процессов наблюдается на все более низких частотах. К концу 2015г. (последние 1000 часов) когерентность снизилась.

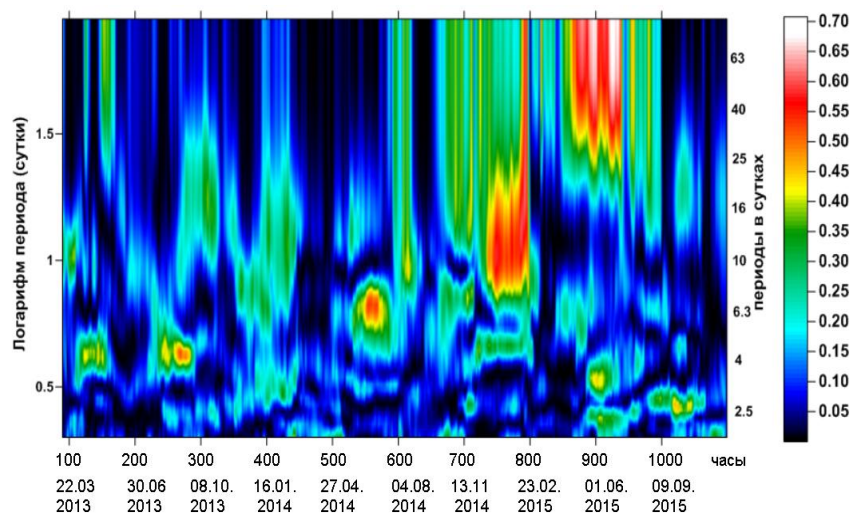


Рисунок 23 – Эволюция квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами: 1) Фурье-агрегированным сигналом 2-го порядка для 4 станций на Камчатке: С1-ШЭП, С1-ШЭП-ЮЗ, С2-ИМФПЭТ, С4_Эссо (рисунок 20b) после перехода к шагу по времени 1 сутки; 2) Фурье-агрегированным сигналом значений медиан 5 ежесуточных значений свойств сейсмического шума на сети 84 широкополосных сейсмических станций F-сет в Японии. Время, сутки от 12.12.2012, правый конец скользящего временного окна длиной 90 суток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследования:

- разработан комплекс программно-аппаратных средств, необходимых для организации и функционирования сети пунктов регистрации нестационарных геоэлектрических процессов в приповерхностной части разреза (на границе тектоносфера-атмосфера), реализующих методику Д.А. Кузнецова;

- установлено существование нестационарных геоэлектрических процессов (разный характер вариаций как между шурфами, так и между отдельными электродами, как во временной, так и в частотной области).

- установлен новый геофизический эффект, обнаруживаемый на компактной многоэлектродной установке. Поведение нестационарных геоэлектрических сигналов оценивается по результатам расчета медианы коэффициентов парной корреляции между рядами измерений на одной станции геоэлектрических измерений на интервале оперативного упреждения сильных землетрясений.

- сформулирован алгоритм идентификации сигналов-предвестников, заключающийся в поиске моментов времени, связанных со всплесками коэффициентов парной корреляции между различными каналами станции геоэлектрических измерений.

- эмпирически установлен критерий отбора нестационарных геоэлектрических сигналов в связи с землетрясениями с магнитудой $M \geq 8$ на земном шаре. При этом на фоне монотонного нарастания/снижения амплитуды сигнала и/или стационарных, медленноменяющихся бухтообразных сигналов наблюдаются кратковременные (от нескольких десятков минут до десятков ча-

сов) знакопеременные или однополярные сигналы или последовательности сигналов, отличающиеся по величине амплитуды более чем в 2.7...3.14 раза от фона.

- установлено, что нестационарные геоэлектрические сигналы регистрируются на оперативном интервале упреждения перед сильными землетрясениями $M \geq 8$, произошедшими в период с 2001 по 2015 г.г., независимо от расстояния между станцией наблюдения до эпицентра землетрясения;

- установлены временные интервалы и характерные периоды всплесков синхронного поведения геоэлектрических сигналов на сети многоэлектродных пунктов в Евразии и временных рядов широкополосных сейсмических станций (сеть F-net на Японских о-вах), проявившийся как глобальный эффект перед сильным мантийным M8.3 Охотоморским землетрясением 24 мая 2013г.

Приведённые исследования позволяют:

- обеспечить преемственность технологии измерений с ранее разработанной Д.А. Кузнецовым методикой регистрации геоэлектрических нестационарных сигналов с помощью программно-аппаратного комплекса, реализующего автоматические измерения и обеспечивающего сбор, хранение и обработку данных в постоянно-действующем операционном центре Дистантной Школы «Космо-Метео-Тектоника» (<http://cosmetecor.org/>);

- выполнять дальнейшее расширение сети геоэлектрического мониторинга, осуществляемого по единой методике, путём организации новых пунктов наблюдений с использованием разработанных унифицированных программно-аппаратных средств и обеспечивать задачи мультипараметрического мониторинга в сейсмоопасных регионах;

- выполнять исследование физических процессов, сопровождающих подготовку сильных землетрясений на основе многопараметрического подхода (С.А. Пулинец, Д.П. Узунов), концепции сейсмотектогенеза (Л.Н. Дода и др.) и электросетевого подхода (Х.Альфвен) как в ретроспективном, так и в оперативном режиме на основе накопленного непрерывного и пополняемого архива наблюдений на сети станций мониторинга.

Предложенная методика комплексного анализа многомерных временных рядов (геоэлектрических и сейсмических) совместно с применением алгоритма идентификации сигналов-предвестников, связанных со всплесками коэффициентов парной корреляции между различными каналами станции геоэлектрических измерений могут представлять собой динамические оперативные оценки текущей сейсмической опасности как на региональном, так и на глобальном уровне.

Указанные методы и технологии были апробированы при изучении нестационарных геоэлектрических сигналов по территории Евразии.

Список опубликованных работ по теме диссертации в изданиях из списка ВАК

1. Bobrovskiy, V.S. The results of subterranean electric measurements on Kamchatka as global effects of proton tectogenesis: damaging earthquakes in Indonesia and China, in *Recent Progress on Earthquake Geology*, P. Guarnieri, Ed. Nova Science Publishers, – 2011, – pp.189-248. (cited in Scopus).
2. Опыт комплексирования глобальных геофизических наблюдений [Текст] / А.А.Любушин, В.С.Бобровский, С.А.Шопин // *Геодинамика и Тектонофизика*. – 2016. –Т. 7(1). – С.1-21. DOI:10.5800/GT-2016-7-1-0194
3. Распределенная сеть электрических измерений в приповерхностных грунтах и некоторые полученные результаты [Текст] / В.С.Бобровский // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – №7. – С. 129-138.

В прочих изданиях:

1. КосмоМетеоТектоника. Главы 01-10 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2011. – 294 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 24.02.2011, №82-В2011.
2. КосмоМетеоТектоника. Главы 11-15 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2011. – 303 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 11.03.2011, №116-В2011.
3. КосмоМетеоТектоника. Главы 16-22 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2011. – 299 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 16.03.2011, №124-В2011.
4. Камчатские подземно-электрические оперативные предвестники всплеска вулканической активизации на Камчатке в эпоху зимнего солнцестояния 2012 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2012. – 66 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 25.12.2012, №467-В2012.
5. Синхронность подземно-электрических вариаций, наблюдавшихся на станциях в городах Горно-Алтайске и Киети (Италия) [Текст] / Бобровский В.С., Iezzi G., Шитов А.В. : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский», 2013. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 11.02.2013, №39-В2013.
6. Камчатские подземно-электрические оперативные предвестники глубокофокусного землетрясения с магнитудой М8.3, возникшего под Охотским морем 2013/05/24 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2013. – 156 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 20.06.2013, №176-В2013.
7. Аномальные формы камчатских подземно-электрических вариаций вблизи пролёта Земли особой орбитальной точки 2013/08/05 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2013. – 55 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 27.08.2013, №247-В2013.
8. Аномальные формы камчатских подземно-электрических вариаций вблизи пролёта Земли особой орбитальной точки 2013/06/20 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2013. – 100 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 09.09.2013, №253-В2013.

9. Камчатские, Алтайские и Итальянские подземно-электрические оперативные предвестники землетрясения с магнитудой М6.6, возникшего около Камчатки 2013/11/12 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов: Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2013. – 185 с. – Деп. в ВИНТИ 03.12.2013 №348-B2013.
10. Камчатские, Алтайские и Итальянские подземно-электрические оперативные вариации 2012-2014 г.г. в эпоху сильнейшего глубокого землетрясения с М8.3 в Охотоморье [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2014. – 75 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 14.04.2014, №94-B2014.
11. Бобровский В.С. Сеть подземно-электрических измерений и некоторые полученные результаты [Текст] / В.С.Бобровский, С.А. Шопин // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти В.П. Булашевича. Материалы конференции, Екатеринбург: УРО РАН, —2015. — С.38-42.
12. Бобровский В.С. Геофизические признаки сильнейшего глубокофокусного Охотоморского землетрясения 24 мая 2013г. [Текст] / Л.Н.Дода, В.Л.Натяганов, В.С.Бобровский, С.А.Шопин // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Восьмые научные чтения памяти В.П. Булашевича. Материалы конференции, Екатеринбург: УРО РАН, — 2015. — С.116-120.
13. Bobrovskiy, V.S. Experimental subterranean electric measurements network utilized in Kamchatka region [Текст] / V.S. Bobrovskiy, S.A. Shopin // 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), — 2015 , — pp.503-507, doi: 10.1109/ICSTCC.2015.7321343
14. Бобровский В.С. Выделение глобальной когерентности геофизических полей статистическим анализом многомерных временных рядов. Тезисы доклада [Текст] / В.С.Бобровский, А.А.Любушин // VIII Международная конференция «Молодые – наукам о Земле». М.: МГРИ-РГГРУ, – 2016. – С. 473-475.
15. Синхронность нестационарных процессов в электрической цепи Солнце ядро Земли в эпоху астротектонического орбитона ПК-Ортектон-2015/02/05 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2015. –13 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 16.03.2015, №54-B2015.
16. Камчатские, Алтайские, Крымские и Итальянские подземно-электрические оперативные предвестники землетрясения с магнитудой М7.8, возникшего в Непале 2015/04/25 [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов : Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2015. – 196 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 12.05.2015, №85-B2015.
17. Наблюдения нестационарных явлений на границе тектоносфера-атмосфера в замкнутом электрическом контуре Солнце-Земля. Подземно-электрические измерения. Электросетевая модель [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов: Дистантная школа «КосмоМетеоТектоника». - Петропавловск-Камчатский, 2015. – 44с. – Деп. в ВИНТИ РАН 12.05.2015, №84-B2015.

Монография

1. Бобровский В.С. Сейсмоглобальная концепция на примере сильнейших землетрясений с магнитудой $M \geq 8$, произошедших в 2001-2015 г.г. [Текст] / В.С.Бобровский, Д.А.Кузнецов. – М.: Научный мир, 2016. – 272 с. ISBN: 978-5-915224-26-0