

ПАВЛОВ Алексей Владимирович

**ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ОБЛАСТИ И ВРЕМЕННОГО
ПЕРИОДА ОЖИДАНИЯ СИЛЬНЫХ КАМЧАТСКИХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА И ИОНОСФЕРНЫМ АНОМАЛИЯМ**

Специальность 25.00.10–Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН)

- Научный руководитель: Богданов Вадим Васильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, с. Паратунка, Елизовский р-н, Камчатский край, главный научный сотрудник лаборатории физики атмосферы.
- Официальные оппоненты: Пулинец Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник.
- Козлов Владимир Ильич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, ведущий научный сотрудник лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", г. Обнинск.

Защита диссертации состоится «26» ноября 2020 г. в 13-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайтах: www.imgg.ru, www.ikir.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайтах www.imgg.ru, www.ikir.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517,

E-mail: andreeva-mu@mail.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03
кандидат физико-математических наук

М.Ю. Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Катастрофические последствия, к которым приводят разрушительные землетрясения, поставили перед человечеством серьезную проблему по обеспечению безопасности населения и уменьшению материального ущерба от негативных проявлений этой стихии. Решение этой проблемы ведется в направлении изучения динамики глубинных геофизических процессов, связанных с подготовкой сильных тектонических землетрясений. При этом методы мониторинга геофизических процессов можно разделить на две группы.

Первая группа – методы сейсмологического мониторинга напряженно-деформированной геосреды, связанные с исследованием изменений сейсмического режима сейсмологическими методами. В частности, для изучения сейсмического режима в работе [Богданов, 2006] был предложен метод вычисления распределения вероятностей возникновения землетрясений для различных случайных событий. В основе данного метода лежит аксиоматический подход А.Н.Колмогорова, примененного к каталогу камчатских землетрясений. Такой подход позволяет для различных областей изучать изменения сейсмического режима как на всем временном периоде инструментальных наблюдений, так и на различных интервалах длительностью в несколько лет.

Вторая группа – методы геофизического мониторинга на основе измерения различных геофизических параметров. В рамках геофизического мониторинга была проведена огромная работа по исследованию уровня и температуры грунтовых вод, их химического состава, эманицией радона, деформацией земной коры и изменения наклона земной поверхности, изменением электропроводности среды и ее механических свойств, вариаций теллурических токов и т.д. [Мячкин, 1978; Моги, 1988; Сидорин, 1992; Соболев, 1993].

Геофизический мониторинг может быть значительно расширен, поскольку в настоящий момент сформировалось понимание, что Земля и околоземное пространство представляют открытую физическую систему. Стала понятна необходимость рассмотрения процессов в различных геосферах в рамках общей концепции солнечно-земных связей с привлечением новых методов и средств прогнозирования землетрясений. Так, накануне крупных землетрясений неоднократно отмечалась связь между процессами, происходившими в литосфере, и возникновением аномалий в некоторых параметрах ионосферы за одни-пять суток до события (краткосрочный прогноз) [Липеровский и др., 1992; Pulinets, Boyarchuk, 2004; Аномальное поведение ..., 2014]. Учитывая, что по последним данным долгосрочного прогноза для Курило-Камчатской дуги наиболее вероятным местом сильнейшего землетрясения ($M \geq 7.7$) является Авачинский залив [Федотов, Соломатин, 2019], актуальность краткосрочного прогноза этого события для Камчатки не вызывает сомнений. Ясно, что, несмотря на сложность строения реальной геосреды, дефицита достоверных данных о ее строении, а также сложности глубинных геофизических процессов, сопровождающих подготовку сильных землетрясений, выполнение успешных краткосрочных прогнозов землетрясений необходимо, хотя и с серьезными принципиальными ограничениями на их точность и надежность.

Существующие в настоящий момент методы определения периодов повышения сейсмической активности на Камчатке [Anomalous behavior of ..., 2017] на основе анализа только ионосферных прогностических признаков не дают ответа на вопросы ни о силе события, ни о месте его возникновения. Возникает необходимость объединения методов сейсмологического мониторинга сейсмического режима на основе анализа каталога землетрясений вероятностными методами (среднесрочный прогноз) и геофизического мониторинга на основе изучения ионосферных параметров (краткосрочный прогноз) с целью разработки методов предупреждения о грозящей опасности, определяя возможную область и период ожидания землетрясения.

Целью работы является выполнение прогностических оценок вероятности, возможной области ожидания (среднесрочный прогноз) и временного периода (краткосрочный прогноз) наступления сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$) в Камчатском регионе на основе совместного анализа аномальных значений сейсмического прогностического признака, полученного на основе вероятностной модели сейсмического режима, и комплекса ионосферных предвестников.

Для достижения сформулированной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Вычислить на основе вероятностной модели сейсмического режима распределения вероятностей $P(A)$ случайного события A "попадание эпицентров землетрясений в заданные интервалы координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ " в заданном скользящем временном окне ΔT с шагом Δt за период с 1962 г. по 2018 г.
2. Вычислить сейсмический прогностический параметр ξ_P , определяющий статистически значимые отклонения текущих значений вероятностей $P(A)$ от их долговременных (фоновых) значений. Оценить периоды ожидания сильных землетрясений с $K_S \geq 13.5$ при достижении параметром ξ_P аномальных значений. Выполнить оценки прогностической эффективности, достоверности и надёжности параметра ξ_P .
3. Выполнить на основе Байесовского подхода прогностические оценки вероятностей наступления сильных землетрясений с $K_S \geq 13.5$ в области ожидания, определённой на основе анализа аномальных значений параметра ξ_P и построить среднесрочные карты ожидания.
4. Выполнить оценки прогностической эффективности каждого ионосферного параметра по отдельности для землетрясений с энергетическими классами $K_S \geq 11.5$, $K_S \geq 12.5$, $K_S \geq 13.5$ и $K_S \geq 14.5$, произошедших в Камчатском регионе. Определить комплекс наиболее информативных ионосферных прогностических признаков для Камчатского региона.
5. Провести совместный ретроспективный анализ сейсмического параметра ξ_P и комплекса ионосферных предвестников для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ за 2009–2018 гг. Оценить прогностическую эффективность методики на основе совместного анализа сейсмического параметра ξ_P и комплекса ионосферных предвестников.
6. Разработать численные алгоритмы и программное обеспечение для оценки эффективности рассматриваемых в работе прогностических признаков, оценки вероятности, области и периода ожидания землетрясений на основе анализа аномальных значений параметра ξ_P и метода Байеса.

Предмет исследования: Сейсмический режим Камчатского региона за период с 1962 г. по 2018 г. с представительного энергетического класса $K_S = 8.5$ до $K_S = 17.0$. Аномальное поведение ионосферных параметров, предшествующее наступлению сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ за период с 2009 по 2018 гг.

Научная новизна работы

1. Впервые на основе вероятностного представления каталога землетрясений п-ова Камчатка получен сейсмический прогностический признак ξ_P , позволяющий выделять аномалии сейсмического режима. Для заданных областей и интервала глубины произведена оценка прогностической эффективности параметра ξ_P для сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.
2. Впервые на основе вероятностной модели сейсмического режима и Байесовского подхода произведены построения среднесрочных карт ожидания и выполнены оценки вероятностей наступления землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.
3. Впервые для Камчатского региона произведена оценка прогностической эффективности ионосферных параметров и определено их наиболее информативное сочетание.
4. Впервые получены прогностические оценки области и временного периода наступления сильных камчатских землетрясений на основе объединения вероятностного сейсмического признака и комплекса ионосферных предвестников.
5. На основании разработанного автором программного обеспечения получены пространственно-временные распределения сейсмического прогностического признака ξ_P , построены среднесрочные карты ожидания землетрясений с $K_S \geq 13.5$, произведена оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений и методики оценки временного периода наступления землетрясений с $K_S \geq 13.5$ на основе комплекса наиболее информативных ионосферных параметров.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено на основе оценки прогностической эффективности сейсмического параметра ξ_P , что данный параметр обладает достаточной информативностью и может быть использован для идентификации изменений в сейсмическом режиме, предшествующим сильным землетрясениям с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.
2. Получены прогностические оценки областей, периодов ожидания и вероятностей наступления землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ в среднесрочной перспективе на основе анализа аномальных значений прогностического параметра ξ_P и Байесовского подхода.
3. Выявлен комплекс ионосферных прогностических предвестников, который может быть использован для идентификации временного периода наступления сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ в Камчатском регионе.
4. Установлено, что анализ сейсмического режима на основе сейсмического параметра ξ_P совместно с анализом комплекса ионосферных параметров позволяет одновременно оценить область, вероятность и краткосрочный период возникновения землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.

Практическая ценность работы. Созданная на основе вероятностной модели сейсмического режима Камчатского региона и Байесовского подхода методика

среднесрочного прогноза, объединенная с методикой краткосрочного прогноза на основе анализа аномального поведения ионосферных параметров может быть использована для определения области и временного периода повышения сейсмической активности. Предложенный в данной работе подход является дальнейшим развитием методики, на основе которой осуществляется еженедельный прогноз сейсмической опасности, который подается в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Автором разработаны программы и база данных, оригинальность которых подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 50200702092 от 27.09.2007, № 2015610919 от 21.01.2015, № 2015618871 от 19.08.2015, № 2019664552 от 08.11.2019, № 2019665191 от 20.11.2019, свидетельством о регистрации баз данных № 2020621176 от 10.07.2020. Программы и база данных внедрены в работу в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Достоверность результатов, представленных в работе, обусловлена:

- применением апробированного и широко используемого в научных исследованиях аксиоматического метода А.Н. Колмогорова;
- применением Байесовского подхода к вычислению условных вероятностей;
- надежность результатов статистического анализа сейсмического режима обеспечена наличием большого объема исходных данных, содержащихся в каталоге землетрясений Камчатки и Командорских островов, (каталог сформирован КФ ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН);
- широко используемыми радиофизическими методами исследования ионосферы (автоматическая ионосферная станция, расположенной в с. Паратунка Камчатского края, работает по программе URSI);
- использованием современных средств геомагнитного мониторинга, входящих в мировую сеть магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ (обсерватория "Паратунка");
- применением общепризнанных методик для оценки эффективности прогностических признаков;
- представленные в данной работе результаты не противоречат результатам, полученными другими методами, дополняют и расширяют возможности изучения сейсмических процессов.

Апробация работы. Результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле», (г. Петропавловск-Камчатский, 2006, 2008); Всероссийской научной школы (Саратов, 2009 г.); Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям "SCM'2006", "SCM'2007", "SCM'2010" (г. Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2010); IV, V, VI, VII, VIII, IX, X Международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений» (с. Паратунка, 2007, 2010, 2013, 2016, 2017, 2018, 2019); II, III, IV, V, VI региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (г. Петропавловск-Камчатский, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019); I Международной научно-технической конференции: «Компьютерные науки и технологии» (г. Белгород, 2009); «Современные

информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» (ITES-2014), (г. Петропавловск-Камчатский, 2014); The 26th IUGG General Assembly (Prague, 2015), а также на семинарах Института космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Исследования, положенные в основу некоторых глав диссертации, выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 11-05-00915-а; Проект Президиума РАН № 12-1-П22-01; Проект по Программе ДВО РАН № 18-05-095.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в разработке методики исследования сейсмического режима Камчатского региона на основе теоретико-вероятностного подхода к каталогу землетрясений. Автор участвовал в обработке ионосферных параметров, оценивал их прогностическую эффективность и определял наиболее оптимальное их сочетание для краткосрочного прогноза сильных землетрясений. На основе сейсмического предвестника и ионосферных прогностических признаков автор лично выполнил прогностические оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений. Им лично были созданы алгоритмы и программы, выполнены все вычисления и графические построения. Автор участвовал в обобщении и анализе полученных результатов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 32 статьи, среди которых 3 статьи в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК (из них 1 статья – по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых), 5 свидетельств программ ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации баз данных, 1 монография, 5 статей в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus, 16 статей, опубликованных в других изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 177 наименований, и двух приложений. Работа содержит 161 лист машинописного текста, 123 рисунка, 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определены актуальность темы исследований, цель и новизна работы, практическая ценность, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора.

В **первой главе** сделан обзор сейсмических предвестников и методов среднесрочного прогноза землетрясений (ЗТ), базирующихся на данных каталогов ЗТ. Представлено описание сейсмичности Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений. Показана целесообразность привлечения аксиоматики А.Н. Колмогорова [Богданов, 2006; Богданов и др., 2009] для анализа сейсмического режима и описан подход к построению вероятностной модели на базе каталога Камчатских ЗТ. Представлен обзор литосферно-ионосферных связей.

Во **второй главе** описана вероятностная модель сейсмического режима Камчатского региона, на основе которой вводится сейсмологический параметр ξ_p , предназначенный для анализа изменений в сейсмическом режиме, предшествующим сильным ЗТ с энергетическим классом $K_s \geq 13.5$. Предложена методика, позволяющая на основе

Байесовского подхода вычислять вероятность наступления сильных ЗТ с $K_S \geq 13.5$ в области ожидания, определённой на основе анализа аномальных значений параметра ξ_P .

Раздел 2.1. Применение аксиоматики А.Н. Колмогорова к каталогу ЗТ позволяет рассматривать каждое ЗТ как элементарное событие ω_i , а весь каталог или его отдельную часть – как пространство элементарных событий Ω . Для множества ЗТ, произошедших за некоторый период времени ΔT , вероятностным пространством является совокупность трех объектов $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$, где Ω – пространство элементарных событий, \tilde{F} – множество подмножеств случайных событий, P – вероятности этих событий. Каждое элементарное событие ω_i может быть охарактеризовано четырьмя случайными величинами $\xi_i(\omega_i) = \{\varphi_i(\omega_i), \lambda_i(\omega_i), h_i(\omega_i), K_i(\omega_i)\}$, где величины $\varphi_i, \lambda_i, h_i$ являются координатами ЗТ, а K_i – энергетическим классом. Время события $t_i(\omega_i)$, как не имеющего математического ожидания, из системы случайных величин исключено, но $t_i(\omega_i)$ учитывается, как параметр, который определяет попадание события ω_i в исследуемый период ΔT . Из системы четырех случайных величин можно составить различные случайные события A, B, C и т.д., определяя различные подмножества множества \tilde{F} , вероятности P которых определяются на основе статистической обработки каталога ЗТ.

В разделе 2.2 показано, что вероятность того, что ЗТ попадает в заданные интервалы широты $\Delta\varphi$, долготы $\Delta\lambda$, глубины Δh и энергетического класса ΔK может быть вычислена следующим образом:

$$P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta K_n) = P(\Delta\varphi_i)P(\Delta\lambda_j|\Delta\varphi_i)P(\Delta h_m|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j)P(\Delta K_n|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m) \quad (1),$$

где $P(\Delta\varphi_i)$ – безусловная вероятность попадания ЗТ в интервал $\Delta\varphi_i$; $P(\Delta\lambda_j|\Delta\varphi_i)$ – вероятность попадания ЗТ в интервал $\Delta\lambda_j$ при условии, что интервал широт равен $\Delta\varphi_i$; $P(\Delta h_m|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j)$ – вероятность попадания ЗТ в интервал глубины Δh_m при условии, что интервалы широты и долготы соответственно равны $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_j$; $P(\Delta K_n|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m)$ – вероятность попадания ЗТ в интервал ΔK_n при условии, что интервалы широты, долготы и глубины соответственно равны $\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j$ и Δh_m ; индексы i, j, m и n обозначают соответствующие интервалы случайных величин.

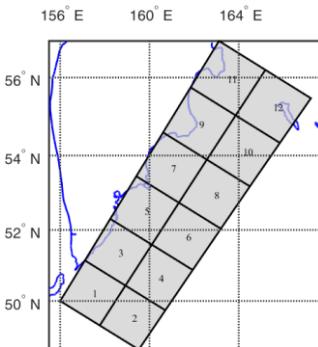


Рисунок 1 – Области S_i .

Для каждой площади S_i ($i = \overline{1, m}$) в скользящем временном окне $\Delta T_k = 1$ год, проходящем с шагом $\Delta t = 1$ месяц временной интервал $T = 1962-2018$ гг., вычисляется вероятность $P_k(S_i) = \frac{n_{ik}}{N_k}$ (рисунок 2), где n_{ik} – число ЗТ с энергетическим классом $K_S \geq 9.0$,

В разделе 2.3 представлена методика расчёта сейсмического параметра ξ_P . Произведена оценка его прогностической эффективности и периодов ожидания ЗТ с $K_S \geq 13.5$ при достижении параметром ξ_P аномальных значений.

Исследуемая сейсмоактивная область, расположенная вдоль восточного побережья Камчатки, включающая в себя Южную и Северную сейсмофокальные зоны, разбивается на $m = 12$ неперекрывающихся площадей с размерами $S = 150 \times 150$ км (рисунок 1).

Для каждой площади S_i ($i = \overline{1, m}$) в скользящем временном окне $\Delta T_k = 1$ год, проходящем с шагом

произшедших в области S_i за период ΔT_k , $N_k = \sum_{k=1}^m n_{ik}$ – число ЗТ с $K_S \geq 9.0$, произошедших на площади $S = \sum_{i=1}^m S_i$ за время ΔT_k . Также в каждой области S_i вычисляются долговременные (фоновые) значения вероятности попадания ЗТ $P_T(S_i) = \frac{n_{iT}}{N_T}$, где n_{iT} – число ЗТ с энергетическим классом $K_S \geq 9.0$, произошедших за время T , $N_T = \sum_{k=1}^m n_{Tk}$ – число ЗТ с $K_S \geq 9.0$, произошедших за T на площади S .

Для получения статистически значимых отклонений текущих значений вероятностей $P_k(S_i)$ от их долговременных (фоновых) значений $P_T(S_i)$ используется параметр ξ_P , определённый на основе [Завьялов, 1984] и представленный в виде:

$$\xi_P = \begin{cases} \frac{\Delta P_k - \text{sign}(\Delta P_k) \cdot |\sigma_{P_k}|}{|\sigma_{P_T}|}, & \text{если } |\Delta P_k| > |\sigma_{P_k}| \\ 0, & \text{если } 0 \leq |\Delta P_k| \leq |\sigma_{P_k}| \end{cases} \quad (2)$$

где P_k и $\sigma_{P_k} = \sqrt{P_k(1-P_k)/n_k}$ – текущие значения вероятности и её стандартное отклонение в скользящем временном окне ΔT_k ; P_T и $\sigma_{P_T} = \sqrt{P_T(1-P_T)/n_T}$ – долговременные значения вероятности и её стандартное отклонение в окне $T > \Delta T_k$; n_i и n_T – число сейсмических событий, произошедших соответственно за временные периоды ΔT_k и T ; $\Delta P_k = P_k - P_T$ – разность между текущим значением вероятности P_k и долговременным значением P_T .



Рисунок 2 – Временной ряд значений вероятности $P_k(S_{12})$. Красными треугольниками на временной оси отмечены ЗТ с $K_S \geq 13.5$.

При поиске периодов активизации сейсмичности за начало аномалии по параметру ξ_P принимается момент появления значений $\xi_P \geq \xi_P^{\text{тр}1}$, а в случае поиска периодов сейсмических затиший, начало аномалии идентифицируется по моменту появления значений $\xi_P \leq \xi_P^{\text{тр}2}$, где $\xi_P^{\text{тр}1}$ и $\xi_P^{\text{тр}2}$ – уровни тревоги, выбираемые экспериментально. При $\xi_P^{\text{тр}2} < \xi_P < \xi_P^{\text{тр}1}$ текущие значения вероятностей существенно не отклоняются от фоновых значений. В данной работе значения критериев для периодов активизации и затиший были выбраны соответственно $\xi_P^{\text{тр}1} = 2.5$ и $\xi_P^{\text{тр}2} = -2.5$.

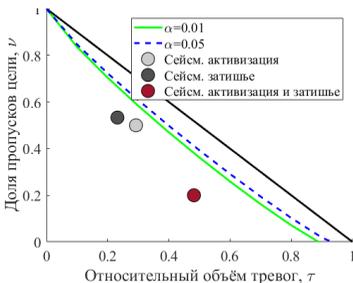


Рисунок 3 – Диаграмма ошибок для параметра ξ_P при прогнозировании ЗТ с $K_S \geq 13.5$

Для каждой области S_i произведена оценка периодов ожидания $T_a^{\text{ож}} = \tilde{T}_a \pm \sigma_{T_a}$ и $T_c^{\text{ож}} = \tilde{T}_c \pm \sigma_{T_c}$ ЗТ с $K_S \geq 13.5$ при обнаружении соответственно аномалий сейсмической активизации и затишья, а также периода ожидания $T_{ac}^{\text{ож}} = \tilde{T}_{ac} \pm \sigma_{T_{ac}}$ по обоим типам аномалий.

Для оценки прогностической эффективности параметра ξ_p использовались следующие характеристики: относительное число спрогнозированных ЗТ (надежность R), относительное число реализованных аномалий (достоверность V), эффективности J_G и J_M , вычисленные соответственно по методикам [Гусев, 1974] и [Molchan, 1990].

Результаты оценки прогностической эффективности параметра ξ_p для ЗТ с $K_S \geq 13.5$ показали, что его надежность $R = 0.8$, достоверность $V = 0.42$. Эффективность прогноза по методике А.А.Гусева составляет $J_G = 1.66$. Так как $J_G > 1.5$, то прогностический признак считается информативным и может использоваться в алгоритмах прогноза ЗТ.

Эффективность прогноза по методике Г.М. Молчана составила $J_M = 0.32$, на диаграмме ошибок (рисунок 3), значения (τ, ν) лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи между идентифицированными аномалиями сейсмического режима с помощью параметра ξ_p и прогнозируемыми ЗТ с $K_S \geq 13.5$.

В разделе 2.4 представлена методика оценки области ожидания, временного периода и вероятности наступления ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ (где K_S^{np} – минимальный энергетический класс прогнозируемого ЗТ).

Исследуемый сейсмоактивный район разбит на m элементарных ячеек S_i , где $i = \overline{1, m}$, которые образуют область $S_{общ}$. Областью ожидания сильного ЗТ будет считаться область $S_{ож}$, включающая в себя элементарные ячейки, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима по параметру ξ_p : $S_{ож} = \sum_{j=1}^l S_j$, где $l \leq m$ – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_p .

Периодом ожидания сильного ЗТ будет являться период $T_{ож} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \tilde{T}_j^{ож}$, где l – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_p , $\tilde{T}_j^{ож}$ – средний период ожидания ЗТ в ячейке S_j , $j = \overline{1, l}$.

Вероятность наступления ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$, при условии, что в ней идентифицированы аномалии сейсмического режима, вычисляется на основе формулы Байеса:

$$P(D_1|E) = \frac{P(D_1) \cdot P(E|D_1)}{P(D_1) \cdot P(E|D_1) + P(D_2) \cdot P(E|D_2)} \quad (3)$$

где событие D_1 – наступление ЗТ прогнозируемого энергетического класса $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$; событие D_2 – отсутствие ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$; вероятность которого $P(D_2) = 1 - P(D_1)$. Событие $E = D_1E + D_2E$ – появление аномальных значений параметра ξ_p . Событие D_1E – наступление ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима, вероятность которого $P(D_1E) = P(D_1) \cdot P(E|D_1)$, Событие D_2E – отсутствие ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима, вероятность которого $P(D_2E) = P(D_2) \cdot P(E|D_2)$.

На рисунке 4, в качестве примера, представлена карта ожидания ЗТ с $K_S \geq 13.5$, построенная на начало суток 28.02.2013 г. Цветом на карте отмечены области, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима на основе параметра ξ_p и которые образуют область ожидания $S_{ож}$, в которой возможно наступление ЗТ. По

формуле (3) вероятность наступления ЗТ с $K_S \geq 13.5$ в области $S_{\text{ож}}$ составила $P(D_1|E) = 0.7$, период ожидания на начало суток 28.02.2013 г. равен $T_{\text{ож}} = 2.3 \pm 1.6$ лет. В области S_1 , входящей в область $S_{\text{ож}}$, 28.02.2013 г. в 14:05:48 на глубине $h = 61$ км произошло ЗТ с энергетическим классом $K_S = 15.2$ ($M = 6.9$).

За период наблюдения 2009–2018 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошло 24 ЗТ и их групп с $K_S \geq 13.5$ и глубинами $h \leq 100$ км. В области ожидания $S_{\text{ож}}$, определённой на основе аномальных значений параметра ξ_P , произошло 21 (87.5%) ЗТ рассматриваемого диапазона энергий. Условная вероятность $P(D_1|E)$ наступления ЗТ в области $S_{\text{ож}}$ составила 0.79 ± 0.1 , а для ЗТ произошедших вне области ожидания $S_{\text{ож}}$, она лежит в интервале 0.61 ± 0.12 .

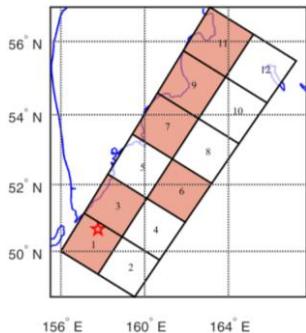


Рисунок 4 – Карта ожидания ЗТ с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, вычисленная на начало суток 28.02.2013 г.

Расчет эффективности прогноза ЗТ с $K_S \geq 13.5$ при выборе в качестве уровня тревоги значений условной вероятности $P(D_1|E) = 0.5$, $P(D_1|E) = 0.7$ и $P(D_1|E) = 0.9$ показал, что наилучшие показатели эффективности достигаются при значении $P(D_1|E) = 0.7$, которые составляют $V = 1$, $R = 0.75$, $J_G = 1.77$ и $J_M = 0.33$.

Так как сейсмический параметр ξ_P является среднесрочным предвестником, для уточнения периода наступления прогнозируемого ЗТ были привлечены краткосрочные ионосферные предвестники с периодом ожидания ЗТ до нескольких суток.

В главе 3 представлен анализ аномального поведения ионосферных параметров накануне ЗТ. Произведена оценка их прогностической эффективности и определено их наиболее информативное сочетание. Проведён совместный анализ сейсмического параметра ξ_P и комплекса ионосферных предвестников.

В разделе 3.1 представлен обзор работ, посвящённых исследованию аномального поведения ионосферных параметров накануне ЗТ в Камчатском регионе. К таким ионосферным возмущениям, которые наблюдались от нескольких часов до 1-5 суток перед наступлением ЗТ, можно отнести: выпадение заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу (образование К-слоя), формирование диффузионного спорадического слоя Es-spread и спорадического слоя Es типа г, превышение значений критической частоты foF2 ионосферного слоя F2 над медианными значениями в периоды возмущённого состояния магнитосферы (определяемыми по магнитным измерениям), формирование диффузионного слоя F2 (F2-spread), расслоение слоя F2 по частоте и высоте.

В разделе 3.2 представлены результаты расчёта прогностической эффективности ионосферных возмущений для ЗТ с энергетическими классами $K_S \geq 11.5$, $K_S \geq 12.5$, $K_S \geq 13.5$ и $K_S \geq 14.5$, произошедших на глубинах до 100 км на расстояниях до $r = 500$ км от пункта ионосферных наблюдений ($\varphi = 52.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.24^\circ$ в.д.) за период 2013–2018 гг. для весенних и осенних сезонов (сезонные изменения ионосферы). Период ожидания ЗТ задавался равным $T_{\text{ож}} = 5$ суток.

Анализ показал, что прогностическая эффективность J_G и J_M , надёжность R возрастают с увеличением прогнозируемого энергетического класса ЗТ, а достоверность прогноза V – уменьшается.

Наиболее информативными, т.е. с наибольшими значениями параметров J_G и J_M для прогнозируемых ЗТ с $K_S \geq 13.5$, являются следующие ионосферные предвестники: критическая частота foF2 ионосферного слоя F2 ($J_G=1.7$; $J_M=0.25$, $V=0.08$, $R=0.6$), расслоение F2 по частоте (режим "V") ($J_G=1.5$; $J_M=0.28$, $V=0.05$, $R=0.85$), К-слой ($J_G=1.34$; $J_M=0.18$, $V=0.05$, $R=0.7$) и спорадический слой Es типа r ($J_G=1.3$; $J_M=0.17$, $V=0.05$, $R=0.75$).

В разделе 3.3 представлен алгоритм краткосрочного прогноза ЗТ на основе комплекса наиболее информативных ионосферных предвестников, определённых в разделе 3.2. Алгоритм основан на совместном анализе рассматриваемых ионосферных возмущений в скользящем временном окне шириной $\Delta T = 5$ суток с шагом $\Delta t = 1$ сутки. Условием для объявления начала периода ожидания ЗТ $T_{ожж} = 5$ суток было появление на временном интервале ΔT как минимум трёх из четырёх рассматриваемых ионосферных параметров.

Для алгоритма был проведен ретроспективный тест его прогностической эффективности на временном интервале $T_1 = 2013–2018$ гг. в весенние и осенние сезоны, а также за полный период $T_2 = 2015–2018$ гг. для ЗТ с $K_S \geq 13.5$, произошедших на глубинах до 100 км в радиусе $r = 500$ км от пункта ионосферных наблюдений. Получено, что при прогнозировании ЗТ с $K_S \geq 13.5$ за период T_1 надёжность $R=0.8$ (т.е. 80% ЗТ имели предвестник), а достоверность $V=0.17$ (т.е. реализованы 17% выявленных аномалий). Значение эффективности $J_G=2.09$ показывает, что прогноз по данной методике статистически значим и в 2 раза отличается от случайного угадывания. На временном интервале T_2 комплекс ионосферных предвестников предшествовал наступлению 73% ЗТ с $K_S \geq 13.5$ ($R=0.73$), но реализовано было только 14% выявленных аномалий ($V=0.14$), при этом эффективность J_G составила 2.53. На диаграмме ошибок (рисунок 5) значения (τ, v) , полученные за периоды T_1 и T_2 для диапазона $K_S \geq 13.5$ лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого комплекса ионосферных предвестников с ЗТ данного диапазона энергетического класса, произошедших на расстояниях до 500 км от пункта

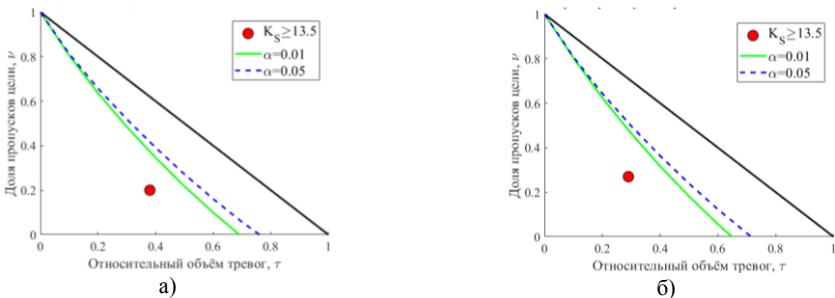


Рисунок 5 – Диаграммы ошибок для алгоритма по комплексу ионосферных предвестников для ЗТ с $K_S \geq 13.5$ за временные периоды: а) $T_1=01.01.2013–31.12.2018$ гг. (весна, осень); б) $T_2=2015–2018$ гг. Нижние границы доверительного интервала случайного прогноза построены для заданных уровней значимости $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.05$.

наблюдения.

В **разделе 3.4** представлена методика определения области и временного периода наступления ЗТ с $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$) на основе совместного анализа сейсмического параметра ξ_P и комплекса ионосферных предвестников В общем виде данный алгоритм можно представить следующим образом:

- 1) Вычисление сейсмического параметра ξ_P для каждой области S_i сейсмоактивного региона на основе формул (1) и (2);
- 2) Вычисление периодов ожидания ЗТ с $K_S \geq 13.5$ при превышении параметром ξ_P заданных уровней тревоги;
- 3) На основе анализа значений ξ_P определение области ожидания $S_{ож}$ и вычисление по (3) условной вероятности $P(D_1|E)$ наступления ЗТ с $K_S \geq 13.5$ в данной области. Если $P(D_1|E) \geq 0.7$, то объявляется период ожидания сильного ЗТ $\tilde{T}_{ож} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l T_j^{ож}$, где l – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_P , $T_j^{ож}$ – период ожидания ЗТ с $K_S \geq 13.5$ в ячейке S_j , $j = \overline{1, l}$.
- 4) Обработка ионограмм и определение ионосферных возмущений. Оценка прогностической эффективности ионосферных параметров;
- 5) Если в течение $\tilde{T}_{ож}$ на временном интервале $\Delta T = 5$ суток обнаружено появление как минимум трёх из четырёх информативных ионосферных параметров, то объявляется период ожидания сильного ЗТ с $K_S \geq 13.5$ длительностью $T_{ож} = 5$ суток.

По этой схеме был проведён ретроспективный анализ для 24 ЗТ и их групп с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, произошедших за период 2009–2018 гг. на глубинах до 100 км в пределах области $S_{общ}$ (рисунок 1), но не более чем в 500 км от пункта ионосферных наблюдений. Из всех рассматриваемых событий 21 (87.5%) ЗТ попало в область ожидания $S_{ож}$, а 3 (12.5%) – в области, где сейсмическая активность не превышала фоновый уровень (пропуск цели). Средняя вероятность $P(D_1|E)$ наступления ЗТ в области ожидания $S_{ож}$ составила ~ 0.78 . Средняя вероятность $P(D_1|E)$, при которой ЗТ произошло вне области ожидания $S_{ож}$ составила ~ 0.67 . Число ЗТ с $K_S \geq 13.5$, перед наступлением которых наблюдался комплекс ионосферных возмущений, описанный в 3.2, составило 19 (79%), при этом 15 из них произошли в области ожидания $S_{ож}$. Таким образом, совместный анализ поведения рассмотренных в работе предвестников перед наступлением 24 ЗТ с $K_S \geq 13.5$ показал, что 15 (62.5%) из них произошли в области ожидания $S_{ож}$ с вероятностью наступления $P(D_1|E) \geq 0.7$, при этом на временном интервале до пяти суток, предшествующему наступлению этих ЗТ, был идентифицирован комплекс ионосферных возмущений.

Была выполнена проверка эффективности прогноза ЗТ с $K_S \geq 13.5$ при совместном анализе сейсмического параметра ξ_P (при значениях условной вероятности наступления ЗТ $P(D_1|E) \geq 0.7$) и комплекса ионосферных предвестников в весенние и осенние сезоны за период $T_1=2013–2018$ гг. и за полный период $T_2=2015–2018$ гг. Значения эффективности J_G за периоды T_1 и T_2 составили соответственно 2.25 и 2.74. Это говорит о том, что прогноз по данной методике статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания.

Значения эффективности J_M за периоды T_1 и T_2 составили соответственно 0.48 и 0.51, а на диаграммах ошибок (рисунок 6) значения (τ, ν) , полученные для диапазона

$K_S \geq 13.5$ лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого комплекса предвестников с ЗТ данного диапазона энергетического класса.

В дополнение к основным результатам можно добавить, что в начале 2020 г. на восточном побережье Камчатки произошли три крупных ЗТ, для которых был дан прогноз по предлагаемой методике: 1) 22.01.2020 г. с $K_S = 14.3$ ($M = 6.4$); 2) 20.02.2020 г. с $K_S = 14.3$ ($M = 6.4$); 3) 25.03.2020 г. с $K_S = 16.9$ ($M = 7.7$).

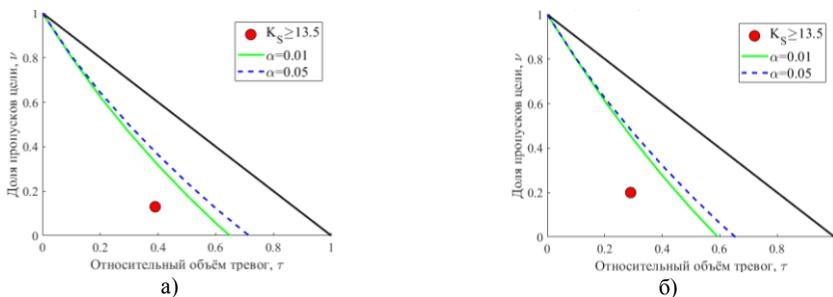


Рисунок 6 – Диаграммы ошибок для методики на основе совместного анализа сейсмического и комплекса ионосферных предвестников для ЗТ с $K_S \geq 13.5$ за периоды: а) 2013–2018 гг. (весна, осень); б) 2015–2018 гг.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

- 1) На основе вероятностного представления каталога землетрясений п-ова Камчатка и вычисленного распределения вероятностей $P(A)$ случайного события A получен сейсмический прогностический признак ξ_P . Анализ параметра ξ_P в 12 областях с размерами 150×150 км за период 1962–2018 гг. показал, что относительное число сейсмических активизаций и затиший, предшествовавших наступлению землетрясений с $K_S \geq 13.5$ составило 42%, при этом выделенные аномалии сейсмического режима предшествовали 80% землетрясений с $K_S \geq 13.5$. Период ожидания землетрясения с $K_S \geq 13.5$ при идентификации аномалий сейсмических активизаций и затиший по параметру ξ_P составил 2.59 ± 2.91 лет. Эффективности прогноза $J_G = 1.66$ и $J_M = 0.32$ позволяют считать данный прогностический признак информативным и использовать в алгоритмах прогноза землетрясений.
- 2) Были построены среднесрочные карты ожидания и вычислены условные вероятности $P(D_1|E)$ наступления для 24 землетрясений и их групп с $K_S \geq 13.5$, произошедших за период 2009–2018 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе, на основе анализа аномальных значений параметра ξ_P и Байесовского подхода. Ретроспективный анализ показал, что 87.5% сейсмических событий произошло в области $S_{о.ж.}$, при этом вероятность $P(D_1|E)$ наступления землетрясения в области $S_{о.ж.}$ составила 0.79 ± 0.1 . Эффективность данной методики при значении условной вероятности $P(D_1|E) = 0.7$ для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ составила $J_G = 1.77$.
- 3) Впервые для Камчатского региона произведена оценка прогностической эффективности ионосферных параметров. Наиболее информативными, т.е. с наибольшими значениями параметров J_G и J_M , являются ионосферные параметры: К-

слой, спорадический слой Es типа r, критическая частота foF2 ионосферного слоя F2 и расщепление F2 по частоте (режим V). Ретроспективный анализ алгоритма на основе комплекса этих ионосферных параметров показал, что прогноз землетрясений с $K_S \geq 13.5$ по данной методике статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания (для весенних и осенних периодов 2013–2018 гг. эффективность $J_G=2.09$, для всего периода 2015–2018 гг. эффективность J_G составила 2.53).

- 4) Привлечение ионосферных предвестников позволяет более точно идентифицировать возможный период наступления землетрясений. Совместный анализ карт распределения аномальных значений параметра ξ_P и комплекса ионосферных параметров перед наступлением 24 землетрясений с $K_S \geq 13.5$, произошедших за период 2009–2018 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе показал, что 62.5% землетрясений произошли в области ожидания $S_{ож}$ с вероятностью $P(D_1|E) \geq 0.7$, при этом за 1-5 суток до их наступления наблюдался комплекс ионосферных возмущений. Оценка прогностической эффективности методики при значении условной вероятности $P(D_1|E) \geq 0.7$ и комплекса ионосферных параметров для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ показала, что прогноз статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания, при этом использование ионосферных предвестников позволяет увеличить эффективность прогноза по сравнению с прогнозом только по сейсмическому предвестнику ξ_P .
- 5) Разработаны численные алгоритмы и программное обеспечение для оценки эффективности рассматриваемых в работе прогностических признаков, оценки вероятности, области и периода ожидания землетрясения на основе анализа аномальных значений параметра ξ_P и метода Байеса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в список ВАК по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

1. Богданов, В.В. Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений / В.В. Богданов, **А.В. Павлов**, А.Л. Полухова // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 6. – С.52–64.

Публикации входящие в список ВАК по другим специальностям

1. Богданов, В.В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02.-01.03.2013 г. и 19.05-24.05.2013 г / В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2018. – № 2 (22). – С. 85-99.
2. Богданов, В.В. Построение на основе сейсмических и ионосферных прогностических признаков методики оценки области временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений/ В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2020.– Т. 30, № 1. – С.59-78.

Свидетельства регистрации разработок и баз данных

1. Богданов В.В., **Павлов А.В.** Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 50200702092 от 27.09.2007 «Программа для расчёта вероятностей сейсмических событий»
2. Богданов В.В., **Павлов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610919 от 21.01.2015 «Программа для расчёта параметров сейсмического режима на основе вероятностной модели каталога землетрясений».
3. Богданов В.В., **Павлов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618871 от 19.08.2015 «Программа для определения периодов повышения сейсмической активности на основе анализа ионосферно-магнитосферных параметров и гравитационного влияния Луны»
4. Богданов В.В., **Павлов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664552 от 08.11.2019 «Программа для анализа эффективности прогноза землетрясений на основе ионосферных возмущений»
5. Богданов В.В., **Павлов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665191 от 20.11.2019 «Программа для оценки области и временного периода ожидания сильного землетрясения».
6. Кайсин А.В., Гашева О.А., **Павлов А.В.** Свидетельство о государственной регистрации баз данных № 2020621176 от 10.07.2020 «Ионограммы вертикального радиозондирования ионосферы (с. Паратунка, Камчатский край)».

Публикации в других изданиях

1. Аномальное поведение ионосферных параметров накануне и после серии землетрясений 28.02–01.03.2013г. / В.В. Богданов, А.В. Кайсин, **А.В. Павлов**, А.Л. Полухова, С.М. Душкина, О.А. Гашева // Сильные камчатские землетрясения 2013 года / колл. монография под. ред. В.Н. Чеброва. – П-Камчатский. – 2014. – С.127–136.
2. Богданов, В.В. Расчёт доверительных интервалов вероятностей попадания сейсмических событий в заданные интервалы энергетического класса / В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // Вестник Камчатского государственного университета. – 2006. – № 5. – С. 68–71.
3. Богданов, В.В. Расчёт параметров сейсмического режима на основе вероятностной модели каталога землетрясений Камчатского региона / В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2016. – № 4 (15). – С. 36–42.
4. Богданов, В.В. Рекуррентные соотношения расчёта параметров сейсмического режима на основе вероятностной интерпретации закона повторяемости / В.В. Богданов, **А.В. Павлов**, А.Л. Полухова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 1. – С. 44–48.
5. Богданов, В.В. Оценка прогностической эффективности параметров вероятностной модели сейсмического режима / В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2017. – № 1 (17). – С. 54–67.
6. Богданов, В.В. Сейсмическое явление как процесс разрушения неустойчивой нелинейной структуры на примере Кроноцкого землетрясения 05 декабря 1997 г. / В.В. Богданов, **А.В. Павлов** // История науки и техники.–2017.– № 8. – С. 51–58.

7. Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity / V.V. Bogdanov, A.V. Kaisin, **A.V. Pavlov**, A.L. Polyukhova, C.V. Meister. // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2017. – Vol. 98. – P. 154–160.
8. Bogdanov, V.V. Analysis of the efficiency of earthquake prediction based on the anomalous behavior of ionospheric parameters on the eve of earthquakes in the Kamchatka region /V.V. Bogdanov, **A.V. Pavlov**// *E3S Web of Conferences*. – 2018. – vol. 62. – 03001 –<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186203001>.
9. Bogdanov, V.V. Calculation of seismic regime parameters on the basis of a probabilistic model of Kamchatka earthquake catalogue / V.V. Bogdanov, **A.V. Pavlov** // *E3S Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 11. – 00002.–<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161100002>.
10. Bogdanov, V.V. Development of a methodology to estimate a region and waiting period for strong Kamchatka earthquakes based on seismic and ionospheric predictive signs / V.V. Bogdanov, **A.V. Pavlov** // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – vol. 127. – 03002–<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912703002>.
11. Bogdanov, V.V. Estimation of the efficiency of the earthquake prediction on the basis of the analysis of ionospheric parameters /V.V. Bogdanov, **A.V. Pavlov** // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – vol. 20. – 03001– <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172003001>.