

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Павлова Алексея Владимировича

«Прогностические оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений по данным сейсмического мониторинга и ионосферным аномалиям», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

**Актуальность исследований.** Рассматриваемая диссертационная работа посвящена одной из актуальных проблем нового активно развивающегося направления в современной геофизике, а именно проблеме литосферно-ионосферных связей, которые наиболее ярко проявляются в сейсмоактивных регионах из-за активно протекающих в них тектонических процессов. Эти процессы могут сопровождаться катастрофическими землетрясениями, поэтому возникает естественная задача по обеспечению безопасности населения и уменьшению экономических потерь. Решение этой проблемы ведется, с одной стороны, в направлении изучения динамики глубинных геофизических процессов в литосфере, с другой стороны, в изучении сопутствующих явлений, которые проявляются в вышележащих геосферных оболочках вплоть до ионосферных и магнитосферных высот. В свою очередь, мониторинг геофизических процессов разделяется на сейсмологический мониторинг напряженно-деформированной геосреды, связанный с исследованием изменений сейсмического режима сейсмологическими методами, и на геофизический мониторинг на основе измерения различных геофизических параметров как в верхней коре Земли, так и в атмосфере и ионосфере. В данной работе рассматриваются оба метода: сейсмологический на основе вероятностной модели, которая базируется на аксиоматическом подходе А.Н. Колмогорова, примененного к каталогу камчатских ЗТ, и геофизический на основе изучения аномального поведения ионосферных параметров накануне крупных землетрясений, зарегистрированного многими исследователями. Если сейсмологический мониторинг дает возможность исследовать изменения сейсмического режима и оценивать возможность возникновения землетрясения в среднесрочном масштабе времени (за месяцы, годы до момента землетрясения), то аномалии в ионосферных параметрах возникают за одни-пять суток до события (краткосрочный прогноз). Учитывая тот факт, что методы краткосрочного прогноза на основе анализа только ионосферных прогностических признаков не дают информацию ни о силе события, ни о месте, то возникает задача об объединении этих двух методов с целью разработки

методов предупреждения о грозящей опасности, определяя возможную область и период ожидания ЗТ.

Поскольку, согласно долгосрочному прогнозу академика Федотова С.А., наиболее вероятным местом сильнейшего землетрясения с  $M \geq 7.7$  является Авачинский залив, то решение задачи краткосрочного прогноза для этого региона с указанием вероятности и возможного места события в среднесрочной перспективе за счет объединения двух методик является актуальным.

**Цель и задачи исследований.** 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 вычислить на основе вероятностной модели сейсмического режима распределения вероятностей  $P(A)$  случайного события  $A$  "попадание эпицентров ЗТ в заданные интервалы координат  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\lambda$ " в заданном скользящем временном окне  $\Delta T$  с шагом  $\Delta t$  за период с 1962 г. по 2018 г.; вычислить параметр  $\xi_P$ , определяющий статистически значимые отклонения текущих значений вероятностей  $P(A)$  от их долговременных (фоновых) значений; оценить периоды ожидания сильных ЗТ с  $K_S \geq 13.5$  при достижении параметром  $\xi_P$  аномальных значений; выполнить оценки прогностической эффективности, достоверности и надёжности параметра  $\xi_P$ ; разработать методику, позволяющую 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  $\xi_P$ ; выполнить оценки прогностической эффективности каждого ионосферного параметра по отдельности 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 в Камчатском регионе. Определить комплекс наиболее информативных ионосферных прогностических признаков для Камчатского региона; провести совместный ретроспективный анализ сейсмического параметра  $\xi_P$  и комплекса ионосферных предвестников для ЗТ с  $K_S \geq 13.5$  за 2009–2018 гг. Оценить прогностическую эффективность методики на основе совместного анализа сейсмического параметра  $\xi_P$  и комплекса ионосферных предвестников; разработать численные алгоритмы и программное обеспечение для оценки эффективности рассматриваемых в работе прогностических признаков, оценки

вероятности, области и периода ожидания ЗТ на основе анализа аномальных значений параметра  $\xi_p$  и метода Байеса.

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

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

**В первой главе** дан обзор материалов, посвященных исследованию литосферно-ионосферных связей, дано описание сейсмических предвестников и методов среднесрочного прогноза землетрясений (ЗТ), базирующихся на данных каталогов ЗТ. Приведено описание сейсмичности Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений. Представлен подход, основанный на аксиоматике А.Н. Колмогорова, который позволяет дополнить методы сейсмологического мониторинга и анализа и построить вероятностную модель на базе каталога Камчатских землетрясений.

**Во второй главе** представлено описание вероятностной модели сейсмического режима Камчатского региона. Приведены примеры различных случайных событий. Показано, что одним из наиболее эффективных прогностических параметров является вероятность  $P(A)$  случайного события  $A$  (попадание сейсмических событий, произошедших в некотором сейсмоактивном объёме  $V$ , в заданные области  $S_i$ , из общей площади  $S_{\text{общ}}$  выбранного сейсмоактивного региона  $S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m S_i$ ). Подробно описана методика исследования сейсмического режима на основе вероятности  $P(A)$  и расчета сейсмологического параметра  $\xi_p$ , предназначенного для анализа изменений в сейсмическом режиме, предшествующим сильным ЗТ. В зависимости от значений параметра  $\xi_p$  определены зоны активизации ( $\xi_p \geq 2.5$ ) и зоны затишья ( $\xi_p \leq -2.5$ ) сейсмического режима. Проведена оценка эффективности. Анализ параметра  $\xi_p$  в 12 областях с размерами  $150 \times 150$  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  $K_S \geq 13.5$ .

Описана методика определения области ожидания  $S_{\text{ож}}$  и временного периода  $T_{\text{ож}}$ . Вероятности наступления ЗТ с  $K_S \geq 13.5$  в области  $S_{\text{ож}}$ , при условии, что в ней идентифицированы аномалии сейсмического режима по параметру  $\xi_p$ , вычисляются по формуле Байеса. За период 2009–2018 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошло 24 землетрясений и их групп с  $K_S \geq 13.5$  и глубинами  $h \leq 100$  км, при этом в область ожидания  $S_{\text{ож}}$ , определённой на основе параметра  $\xi_p$ , попало 21 сейсмическое

событие рассматриваемого диапазона энергий. Условная вероятность наступления землетрясений в области  $S_{ож}$ , рассчитанная по Байесу, составила  $0.79 \pm 0.1$ , а для землетрясений, произошедших вне области ожидания  $S_{ож}$ , она лежит в интервале  $0.61 \pm 0.12$ . Рассчитанная эффективность прогноза позволяет считать прогностический признак  $\xi_p$  информативным и использовать в алгоритмах прогноза землетрясений.

В главе 3 представлен анализ аномального поведения ионосферных параметров накануне ЗТ. Произведена оценка их прогностической эффективности и определено их наиболее информативное сочетание. Полученные значения эффективности показывают, что прогноз землетрясений с  $K_S \geq 13.5$  по данной методике статистически значим и в 2 раза отличается от случайного угадывания. Подробно описана методика определения области и временного периода наступления сейсмического события с  $K_S \geq 13.5$  ( $M \geq 6.0$ ) на основе совместного анализа сейсмического параметра  $\xi_p$  и комплекса ионосферных предвестников. Ретроспективный анализ, проведённый по данной методике для 24 сейсмических событий с  $K_S \geq 13.5$ , произошедших в Камчатском регионе за 2009–2018 гг., показал, что 62.5% из них произошли в области ожидания  $S_{ож}$ , в которой вероятность наступления события, рассчитанная по Байесу, была больше 0.7. На основе разработанной в 3 главе методики, объединяющей анализ параметра  $\xi_p$  и комплекс ионосферных предвестников, применённой к трём крупным камчатским сейсмическим событиям с  $M \geq 6.0$ , произошедших с января по март 2020 г. показала, что за 3-5 суток перед наступлением всех событий наблюдались как минимум 3 из 4 ионосферных параметра. Кроме того, два сейсмических события произошли в области ожидания  $S_{ож}$ , определённой по параметру  $\xi_p$ , а одно событие – на границе с областью  $S_{ож}$ .

В **Заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Изучение сейсмо-ионосферных эффектов является одним из приоритетных направлений исследований в проблеме поиска прогностических признаков с целью разработки методик предупреждения о грозящей опасности, определяя вероятность, возможную область и период ожидания ЗТ.

Научная новизна состоит в том, что впервые на основе вероятностного представления каталога землетрясений п-ова Камчатка получен сейсмический прогностический признак  $\xi_p$ , позволяющий выделять аномалии сейсмического режима. На основе вероятностной модели сейсмического режима и Байесовского подхода впервые разработана методика построения среднесрочных карт ожидания и оценки вероятностей

наступления землетрясений с энергетическим классом  $K_S \geq 13.5$ . Для Камчатского региона впервые произведена оценка прогностической эффективности ионосферных параметров и определено их наиболее информативное сочетание. Впервые на основе объединения вероятностного сейсмического признака и комплекса ионосферных предвестников получены прогностические оценки области и временного периода наступления сильных камчатских землетрясений. Для реализации целей и задач диссертации Павловым А.В. разработано программное обеспечение, получены пространственно-временные распределения сейсмического прогностического признака  $\xi_P$ , 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.

Автор применяет известные и апробированные научные методы для обоснования полученных результатов и выводов. Представленная в работе объединенная методика основывается на установленном из научных литературных источников факте наличия литосферно-ионосферных связей и влияния на заключительной стадии подготовки землетрясения на параметры ионосферы.

#### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы определяется важностью полученных научных и практических результатов для дальнейшего изучения литосферно-ионосферных связей. Предложенная методика может быть использована в комплексе с другими направлениями исследования и методами в целях повышения достоверности и надежности прогностических оценок возможных катастрофических сейсмических событий.

#### **Замечания к работе**

К сожалению, диссертация не лишена некоторых недостатков. Представляется, что в диссертации недостаточно отражены работы зарубежных сейсмологов. Например, несмотря на то что концепция самоорганизованной критичности в течение более чем 20 лет была преобладающим трендом в сейсмологии, и того, что в работе используются вероятностные методы для описания сейсмического режима, это направление стоило бы упомянуть. Результатом этого недостатка является также некорректное утверждение о том, что “в настоящее время пока не найдено надёжных критериев выявления форшоков на фоне фоновых сейсмических событий” (стр. 15). В работах греческого сейсмолога G. Paradoroulos даны четкие определения форшоковой активности и описаны экспериментальные методы её идентификации. Тем не менее, указанные недостатки ни в

