

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт динамики геосфер имени
академика М.А. Садовского
Российской академии наук (ИДГ РАН)
доктор физико-математических наук



С.Б. Турунтаев

27 апреля 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Эртелевой Ольги Олеговны
«Параметры сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений»
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 25.00.10 — «геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

Диссертационная работа Эртелевой О.О. представляет совокупность авторских результатов многолетних исследований сильных движений в эпицентральных областях землетрясений и прогнозирования количественных параметров сильных движений грунта, которые рассматриваются в контексте анализа сейсмической опасности и сейсмических воздействий как части проектирования строительных объектов. Тема выполненной работы несомненно **актуальна**. Действительно, в условиях отсутствия априорной информации о времени и месте сейсмического события, надёжные оценки количественных характеристик сейсмического движения грунта от различных источников на различных расстояниях являются краеугольным камнем при разработке сейсмостойких конструкций. При этом изучаемые диссертантом закономерности могут оказаться востребованными не только в инженерных целях задания сейсмических воздействий при проектировании зданий и сооружений, но и при проведении фундаментальных исследований в области физики очага землетрясения.

Заявленной **целью работы** является «повышение точности прогноза количественных характеристик сейсмических воздействий», однако среди основных результатов работы нет цифр конкретного повышения точности определения тех или иных характеристик в процентах или абсолютных единицах измерения по сравнению с предыдущими работами. Скорее, работа предлагает не более точные оценки в терминах погрешностей и допусков, а новый эмпирический формализм в описании регистрируемых особенностей сильных движений грунта, что соответствует более

амбициозной цели комплексного изучения характеристик волнового поля от сейсмических событий на различных эпицентральных расстояниях. Конкретные **задачи работы** включают установление закономерностей формирования и распространения сейсмических колебаний при землетрясениях, изучение взаимосвязей различных характеристик колебаний, разработку корреляционных соотношений параметров сейсмических колебаний с параметрами очага и среды для прогнозирования сейсмических воздействий. Вместе с тем, учитывая общую нацеленность работы на практический результат, её базовый алгебраический инструментарий и общий нарратив инженерной сейсмологии, целеполагание диссертации следует признать корректным и соответствующим современным концепциям развития этой области знаний, а задачи исследования полностью соответствующими его цели.

В отличие от современных работ западных исследователей, которые развивают единую сквозную модель затухания сейсмических колебаний с функциями-модуляторами, учитывающими различные факторы влияния, диссертант сохраняет приверженность классическому зональному принципу описания параметров сейсмических колебаний с помощью кусочно-заданных линейных функций. Важной **новацией** работы является выделение части «ближней» зоны в так называемую «разломную» зону наименьшего удаления от очага. Для неё, а также «ближней» и «дальней» зон представлены **новые** предиктивные корреляционные соотношения между различными параметрами регистрируемого волнового поля сейсмических колебаний, которые, по данным Эртелевой О.О., действительны в любом регионе земного шара, т.е. являются среднемировыми.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержание работы изложено на 290 страницах, включая 77 рисунков, 21 таблицу и 63 страницы библиографии, состоящей из 512 источников.

Во **введении** убедительно обоснована актуальность темы исследования с кратким экскурсом в степень её разработанности, сформулированы цели, основные задачи и защищаемые положения работы, заявлена научная новизна, степень достоверности полученных результатов и их теоретическая и практическая значимость, обозначена методология исследования, дана информация о научной апробации результатов, публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава содержит обзор литературных данных по теме сейсмических воздействий в ближней зоне землетрясения. Показано, что опубликованные результаты содержат противоречия – начиная с самого определения «ближняя зона» и до

многочисленных корреляционных соотношений (как экспериментальных, так и теоретических) между регистрируемыми/ожидаемыми параметрами волнового поля и параметрами очага и среды распространения. Кроме того, справедливо высказанное диссертантом утверждение о недостатке исследований ближней зоны в скоростях по сравнению с ускорениями. Детальное рассмотрение особенностей каждого корреляционного соотношения является важным достоинством диссертации, свидетельствует об эрудиции автора и естественным образом завершается постановкой задач диссертации.

Во **второй главе** обосновывается выбор прогностического метода, перечислены анализируемые факторы влияния на параметры сейсмических колебаний, описана эмпирическая база данных параметров сильных движений грунта и привлекаемые инструменты математической обработки данных. Ключевой методологией диссертации является статистическая обработка результатов инструментальных наблюдений за сильными движениями грунта на малых расстояниях от сейсмического события с целью установления устойчивых корреляционных связей между параметрами регистрируемых колебаний, параметрами очага и среды с попыткой определения точности таких соотношений. В результате исследования ожидаются эмпирические прогнозные соотношения, которые могут иметь практическое применение в сейсмостойком строительстве. Анализируемая база данных включает измерения сильных движений грунта от событий с различными механизмами очага, магнитудой $M_S < 9$ и глубиной до 400 км практически из всех регионов земного шара за более чем 80-летний период. В качестве ключевых характеристик, определяющих параметры сейсмических колебаний, выбраны магнитуды, расстояния, типы подвижки в очаге и грунтовые условия.

В **третьей и четвёртой** главах проводится анализ экспериментальных данных в ускорениях и скоростях, соответственно. Чтобы установить эмпирические зависимости, привлекается аппроксимация облака точек линейной функцией одной или нескольких переменных и параметрических констант, а также визуальное сопоставление гистограммы однофакторной частичной выборки с функцией Гаусса, имеющей мат.ожидание и стандартное отклонение этой выборки (т.е. проверка нормального распределения ошибки в выборке). Диссертант выводит закон затухания пиковых амплитуд ускорений и скорости грунта в эпицентральной области землетрясения и обнаруживает 3 зоны с различными законами затухания волн. Представлены корреляционные зависимости между пиковыми амплитудами ускорений (скоростей) на

различных компонентах в зависимости от уровня колебаний, магнитуды, расстояния, типа грунта и механизма очага землетрясения. Рассмотрены соотношения компонент сейсмограммы, проанализирована зависимость её длительности от параметров среды и очага, рассмотрены особенности формы спектра реакции и преобладающих периодов колебаний. Оценены средние значения коэффициента динамического усиления и влияние различных факторов на его величину. Один из сильных выводов этих глав состоит в том, что полученные среднемировые соотношения затухания применимы для разных районов и землетрясений разных магнитуд, и, например, уровни пиковых ускорений грунта могут быть оценены по среднемировым соотношениям с приемлемой точностью практически в любой точке земного шара.

Практические аспекты эмпирического прогнозирования ожидаемых параметров сейсмического движения грунта изложены в **пятой** главе. Приводятся детальные алгоритмы оценки спектров реакции в ускорениях и скоростях, включая оценки для случаев отсутствия данных экспериментальных наблюдений в зонах возможных очагов землетрясений (т.е. по общемировым данным и соотношениям из глав 3 и 4). Рассмотрены региональные факторы влияния на сейсмические воздействия. Сформулированы принципы создания региональных банков акселерограмм. Приведены два практических примера расчёта спектров реакции, подтверждающих эффективность предложенных алгоритмов.

В **заключении** суммируется вся представленная новая информация о структуре сейсмического волнового поля в ускорениях и скоростях в контексте вклада диссертации в задачу оценки сейсмической опасности и прогноза количественных характеристик сейсмического движения грунта. Сформулированы направления дальнейшей работы.

Диссертант утверждает, что «высокая **степень достоверности** полученных результатов обеспечивается применением в ходе исследований представительного объема эмпирического материала и современных методов анализа и обработки эмпирических данных, принятых в мировом научном сообществе, а также современным оборудованием и программным математическим обеспечением». Под «современными методами анализа данных» понимается предложенная Гауссом линейная и многопараметрическая регрессия, а также визуальное сличение столбцовых гистограмм с функцией нормального распределения. Важно отметить, что в мировом научном сообществе обычно не ограничивают себя столь скудным арсеналом при анализе данных, однако работы по инженерной сейсмологии действительно иногда

апеллируют исключительно к базовым инструментам статистической обработки, и с этой точки зрения достоверность полученных результатов, по-видимому, может быть признана удовлетворительной.

Теоретическая значимость работы определяется новизной предложенных эмпирических соотношений, которым ещё, по-видимому, предстоит пройти надлежащую физико-математическую формализацию, включая фундаментальное объяснение с точки зрения физики очага и особенностей среды распространения. **Практическая значимость** исследования подтверждается фактом включения некоторых результатов диссертации в такие нормативные документы РФ как ГОСТы, метрологические, регуляционные и строительные Своды правил (полный список приведен на стр. 12 диссертации), в которых содержатся **практические рекомендации по использованию выводов диссертации.**

Автореферат в достаточной степени раскрывает содержание диссертации. С 1993 по 2019 год Эртелева О.О. с соавторами опубликовала **29 работ** по теме диссертации в изданиях **Перечня ВАК**, включая российские журналы «Физика Земли» (5), «Вулканология и сейсмология» (1), «Сейсмостойкое строительство – Безопасность сооружений» (8), «Инженерные изыскания» (5), «Вопросы инженерной сейсмологии» (8), «Геориск» (1) и одну статью в зарубежном журнале «Natural Hazards».

Замечания по работе:

1. На всех графиках диссертации, являющейся, по сути, статистическим исследованием, отсутствуют планки стандартного отклонения. Практику пренебрежения планками стандартного отклонения вряд ли можно признать приемлемой в силу того, что в так называемой «разломной зоне» они критически важны, а в «ближней зоне» – просто необходимы, причём не только по оси ординат, но и по оси абсцисс. Действительно, при анализе данных на малых расстояниях нельзя пренебречь размерами очага, и без пространственного сопоставления оценок и измерений (с соответствующей ошибкой), по представленной графической информации невозможно сделать какие-либо достоверные, статистически значимые выводы, что в значительной степени лишает такой подход смысла. Соответственно, регрессионный анализ должен проводиться с учётом этих погрешностей (т.е. с применением весовых коэффициентов пропорциональных погрешностям по обеим осям), либо диссертант должен в явном виде указать, что полученные результаты обусловлены принятым допущением о равновеликой и нулевой погрешности измерений по обеим осям. Такое допущение, несомненно, является избыточно сильным

и снижает ценность полученных закономерностей, особенно в разрезе заявленной общемировой общности соответствующих геофизических интерпретаций. Наконец, критически важно, что погрешность по оси абсцисс – один из важнейших факторов влияния и аспектов исследования, упоминаемый, например, в других работах как ошибка определения расстояния до очага – вообще не обсуждается в диссертации, что также позволяет усомниться в глубокой обоснованности некоторых выводов.

2. Результаты регрессионного анализа приводятся в усечённой форме: только значения углового коэффициента и свободного члена (без погрешностей), и стандартное отклонение набора данных от полученной кривой. Между тем, стандартное отклонение позволяет сделать вывод лишь о том, насколько хорошо линейная функция с данным наклоном и свободным членом аппроксимирует анализируемый набор данных, не конкретизируя вклад в ошибку каждого из регрессионных параметров. В условиях кусочно-заданного формализма с ключевой ролью углового коэффициента в так называемых «разломной» и «ближней» зонах, и свободного члена в «дальней» зоне такая статистика абсолютно недостаточна: совершенно неясно, насколько значимо отличается наклон (свободный член) в соседних зонах и является ли именно он, а не какой-то другой фактор определяющим для анализируемой зональной выборки. А проверка на коллинеарность переменных в случае многопараметрической регрессии вообще не проводилась. Более того, статистическая значимость отличий каждой из зональных выборок не анализируется вообще: ни взаимно (между выборками), ни с «генеральной совокупностью». И, если уж диссертант отказывается от современных методов анализа данных (см. замечание №3), то предоставление абсолютно всех регрессионных погрешностей и статистик, а также использование классических статистических инструментов тестирования гипотез (критерий Стьюдента, t-тест, апоча, и др.) для обоснования независимости зональных выборок представляется насущной необходимостью.

3. Вводя трёхзонную модель зависимости ключевых характеристик поля сейсмических движений грунта от расстояния, диссертант в качестве обоснования апеллирует к особенностям визуального восприятия анализируемого набора данных читателем: «Как видно из рисунка 3.5, четко выделяются три зоны, в каждой из которых можно построить свою аппроксимирующую прямую» (стр. 95), или «Тогда, анализируя полученные эмпирические распределения скоростей из нашей базы данных, получаем, что все поле скоростей, как и в случае пиковых ускорений, можно разделить на 3 зоны, в каждой из которых затухание амплитуд протекает по своим законам» (стр. 162).

Визуальный анализ диссертант закрепляет линейной регрессией данных в трёх промежутках расстояний до источника. Формальные критерии выделения так называемых «точек поворота» и разграничения зон не формулируются, устойчивость разбиения облака точек на 3 зоны не проводится, также как и сравнение с другими возможными вариантами аппроксимации – двухзонная структура, непрерывная нелинейная и/или модулированная функция/функции, и т.д. Между тем, для выявления наилучшей кривой или семейства кривых, описывающих набор данных в виде облака точек (в более широком понимании – его форму), выработаны многочисленные статистические и геометрические методы, дающие устойчивый результат даже в присутствии таких осложняющих факторов, как малое количество измерений, наличие шума или выбросов (далеко отстоящих значений). К ним можно отнести концепции медианной оси, скелета, статистической глубины, оболочки и контура облака точек, которые реализованы в алгоритмах типа ячеек Вороного, бета-скелет или альфа-шейп различного порядка и глубины (Туки, Махаланобиса, статистической, локальной, и т.д.). Они позволяют ответить на вопрос о количестве (одна, две, три, и т.д.) и типе (линейные, нелинейные, и т.д.) функций, позволяющих описать пространственные вариации формы облака точек в одно- и многомерном пространствах с наперёд заданной точностью или с определением апостериорной ошибки. Применение этих методов позволяет автоматически получить количественную оценку того, насколько устойчива аппроксимация в терминах типа/количества функций, границ зон и т.д. Фактически, пункты диссертации 3.1 и 4.2 представляют усечённые результаты линейной регрессии, основанной на авторском, по сути, субъективном восприятии особенностей анализируемого набора данных, что открывает большой простор для тенденциозных интерпретаций и неоднозначных выводов.

4. Одним из результатов неоднозначного построения регрессионных прямых в дальней зоне является вывод диссертанта о том, что «различия [между кривыми затухания], проявляющиеся в дальней зоне, определяются грунтовыми условиями в точке регистрации и магнитудой землетрясения» (стр. 122). Между тем, в целом ряде публикаций (см., например, [Graizer, Kalkan, 2011] из библиографии диссертации) показано, что поведение кривой затухания в этой зоне может в значительной степени определяться не столько грунтами и другими структурными особенностями мелкого залегания под станцией, сколько типом и мощностью осадочного слоя (так называемый эффект «мощного осадочного слоя» – «basin effect»). Так как в диссертации анализируются нормированные расстояния, провести прямое сопоставление

вышеупомянутых результатов, кажущихся противоречивыми, без пересчёта графиков, к сожалению, невозможно. Однако игнорирование диссертантом важных выводов других авторов не добавляет уверенности в справедливости сделанных заключений и, как минимум, ограничивает заявленную общность выводов работы.

5. В пунктах 3.2 – 3.4 и 4.4 – 4.5 исследуется взаимосвязь различных регистрируемых параметров волнового поля и выявляются возможные их функциональные зависимости. При этом, рассматривая результирующие выражения и значения как функции различных факторов, диссертант пренебрегает надлежащими формальными статистическими процедурами дисперсионного многофакторного анализа. Фактически, все выводы в этих пунктах работы делаются на основе *визуальной* проверки фундаментальной предпосылки о нормальности распределения той или иной арифметической выборки (все рисунки с гистограммами, начиная с рис. 3.12 на стр. 126 и далее). Все прочие необходимые статистические критерии и тесты не исследуются, за исключением, в некоторой степени, проверки гомоскедастичности отдельных выборок, дисперсии для которых либо сведены в таблицы, либо достаточно бессистемно приведены в тексте. Анализ влияния ширины интервалов гистограмм и их представительности на выходные результаты отсутствует, также как и мотивация выбора равноширинного, а не, например, частотного принципа их формирования. При таком минималистском подходе к анализу статистических данных нулевая гипотеза о равенстве (или сопоставимости) эффектов влияния на исследуемые выборки с неизвестными, но равными (или сопоставимыми) средними величинами принимается аксиомой, что фактически предопределяет результирующие оценки.

6. Автор демонстрирует необоснованно легкое отношение к вопросу масштабного эффекта землетрясений. Отмечено, что «В ходе исследований применялось понятие подобия из теории подобия и размерностей» (стр. 92) и отмечено, что необходимо «использовать соответствующий числовой коэффициент, называемый масштабирующим множителем» (стр. 93); хотя решение вопроса масштабного эффекта землетрясений, занимающее научное сообщество последние десятилетия, до сих пор не нашло однозначного решения и оно весьма далеко от определения геометрического подобия.

7. Имеются недостатки в техническом оформлении рукописи и подаче материала. В первую очередь это размытые и некорректные формулировки. Например, Введение содержит весьма спорное утверждение о том, что «Точный прогноз времени и места –

наиболее простой путь к решению поставленной проблемы (безопасности)» (стр. 6). Вот еще несколько примеров:

- «... для получения корреляционных зависимостей применялись компьютерные программы множественной корреляции», что такое «множественная корреляция» (стр. 92) и какие конкретно программы и алгоритмы применялись, не конкретизируется;
- «часто под очагом понимается сам разрыв. Понятно, что поверхность не может содержать запасов энергии...» (стр. 20);
- «итогом исследований количественных параметров сейсмического колебания грунта является возможность их прогнозирования при оценке сейсмических воздействий» (стр. 64);
- «любой спектр как частотная характеристика сейсмического процесса, во многом определяется преобладающей частотой (или, что то же самое, периодом) колебаний» (стр. 77);
- «В дальней зоне продолжительность скорости зависит от магнитуды...» (стр. 205) и пр.

В некоторых разделах не приведены ключевые данные. Например, в разделе 3.1 отмечено, что «исследовалась зависимость затухания пиковых ускорений от типа механизма очага» и далее следуют выводы; тогда как для всех остальных выборок приведены графики.

Присутствуют опечатки (например, стр. 33 – «спектры» вместо «спектра», стр. 37 – «волна» вместо «волны», стр. 103 – «подвижка» вместо «подвижки», стр. 127 – «имеет вид», и др.).

Диссертация Эртелевой Ольги Олеговны выполнена на актуальную тему, обладает элементами научной новизны. В работе сформулированы новые подходы к решению задачи прогнозирования количественных параметров сильных движений грунта. Решение этой задачи играет важную роль при оценке сейсмической опасности и задании сейсмических воздействий в ходе проектирования строительных объектов повышенной ответственности, и, соответственно, перспективы практического применения результатов работы весьма благоприятны. Высказанные замечания относятся преимущественно к физико-математической формализации проводимых автором исследований, однако с концептуальной точки зрения представленную совокупность выводов работы Эртелевой О.О. можно признать существенным вкладом в разработку темы прогнозирования количественных характеристик сильных движений

грунта в ближней зоне сейсмического события, который, возможно, определит логику дальнейшего развития этого научного направления. На этом основании, согласно критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), Эртелевой О.О. может быть присуждена учёная степень доктора физик-математических наук по специальности 25.00.10 — «геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Сотрудники «Лаборатории сейсмологических методов исследования литосферы» и «Лаборатории приповерхностной геофизики», ведущие исследования по тематике близкой к теме работы, представили и приняли участие в обсуждении диссертации, автореферата и отзыва на диссертацию Эртелевой О.О. на заседании Учёного совета ИДГ РАН «23» апреля 2020 года, который одобрил настоящий документ в качестве официального отзыва ведущей организации (протокол № 4/20).

Авторы отзыва согласны на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Эртелевой О.О. в диссертационном совете Д002.001.01, и их дальнейшую обработку.

Ведущий научный сотрудник
«Лаборатории сейсмологических методов
исследования литосферы»
доктор физ.-мат. наук

Краснощеков Дмитрий Николаевич

тел.: (495) 939-7949
почтовый адрес: 119334 г. Москва, Ленинский пр-кт д.38, корп.1
эл. почта: krasnd@idg.chph.ras.ru

Ведущий научный сотрудник
«Лаборатории приповерхностной геофизики»
кандидат физ.-мат. наук

Кишкина Светлана Борисовна

тел.: (495) 939-7573
почтовый адрес: 119334 г. Москва, Ленинский пр-кт д.38, корп.1
эл. почта: kishkinas@idg.chph.ras.ru

Подписи сотрудников Д.Н. Краснощекова и С.Б. Кишкиной заверяю:

Учёный секретарь ИДГ РАН, д.г.-м.н.

Болдовский Н.В.