

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу Крылова Артёма Александровича
«Оценка сейсмических воздействий на шельфе», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»**

Диссертационная работа А.А. Крылова посвящена исследованию существующих и разработке и обоснованию новых расчетных методов и подходов к обработке данных сейсмологических инструментальных наблюдений для оценки сейсмических воздействий на морском шельфе.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и содержит 150 страниц текста, включая 52 рисунка, 7 таблиц и список литературы (не пронумерованный) из 187 наименований.

Введение диссертации изложено на 13 стр., и включает рубрики, в которых согласно требованиям ВАК обсуждаются актуальность работы, цели и задачи исследования, основные защищаемые положения, научная новизна, вклад автора и другие важные показатели научной работы. Представлено четыре защищаемых положения, обосновываемых по новизне, обеспеченности фактическим материалом, теоретической и практической значимости. Результаты, полученные по теме диссертации, опубликованы в 19 работах, из которых 6 – в журналах из списка ВАК, 1 – в российском государственном фонде алгоритмов и программ и 12 – в тезисах докладов в публикациях материалов российских и международных конференций.

Первая глава диссертации представляет собой обзор методологии и проблем оценки сейсмических воздействий для площадок строительства, включая площадки в условиях шельфа. Представлен краткий обзор нормативных основ таких изысканий. Обсуждается структура и этапность работ по оценке сейсмических воздействий и особенности оценки сейсмических воздействий для площадок на шельфе. В общем плане излагаются технические и методические вопросы инструментальных сейсмологических исследований для уточнения сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования, а также специфика таких работ в условиях морского шельфа. Дается краткое представление об основных расчетных методах оценки сейсмической опасности, расчетных алгоритмах синтезирования искусственных акселерограмм и способах расчетной оценки влияния локальных грунтовых условий на сейсмические колебания.

Во второй главе диссертации пунктирно обозначены последовательность обработки непрерывных цифровых записей, полученных автономными сейсмостанциями при длительных инструментальных сейсмологических наблюдениях, и технология

определения основных параметров землетрясений по записям локальной сети донных станций. Здесь же представлен разработанный соискателем алгоритм автоматического обнаружения сигналов от землетрясений при компьютерной обработке непрерывных записей. Для иллюстрации работоспособности и эффективности алгоритма автоматической обработки сейсмологических данных приведены некоторые результаты применения алгоритма к реальным записям одной из морских сейсмологических экспедиций. В частности, алгоритм позволил выявить 81% землетрясений на записях (по сравнению с ручной обработкой). В то же время, при автоматической обработке в 24% случаев обнаружения «полезных» сигналов срабатывания алгоритма оказались ложными.

Далее упоминаются избранные результаты исследований локальной и близкой сейсмичности по данным инструментальных мониторинговых наблюдений на шельфе Черного, Каспийского, Балтийского морей, а также в районе Центральных Курил.

Кроме этого, поясняется, как определяются приращения балльности и оцениваются скорости распространения поперечных сейсмических волн в грунтовой толще исследуемых площадок на шельфе с использованием записей локальной сети донных сейсмостанций для целей сейсмического микрорайонирования (СМР).

В этой главе содержится обоснование первого защищаемого положения диссертации:

- Совместный анализ длительности сейсмического сигнала и его корреляции на разных сейсмостанциях и каналах, составляющий основу предложенного метода автоматического выявления сейсмических событий, дает возможность эффективно обрабатывать записи локальных сетей донных сейсмографов, полученные на шельфе, что подтверждено на реальных записях.

Третья глава диссертации посвящена развитию расчетных методов сейсмических воздействий для площадок на шельфе. В главе поясняется необходимость использования для оценки сейсмических воздействий, наряду с материалами инструментальных сейсмологических наблюдений, результатов применения расчетных методов определения характеристик сильных воздействий. Дается краткое и ясное описание метода вероятностного анализа сейсмической опасности (сейсмического риска) и излагаются основы методики расчета (синтезирования) искусственных акселерограмм на базе построенной сеймотектонической модели без использования реальных записей землетрясений. Применение такого метода с использованием широко известной компьютерной программы SEISRISK III продемонстрировано на примере уточнения исходной

сейсмичности и построения численных моделей исходных сейсмических воздействий (спектров реакции и акселерограмм) для исследуемого района на севере Каспийского моря.

На примере метода Ирикуры рассматриваются проблемы синтеза акселерограмм сильных движений методом эмпирической функции Грина с использованием реальных записей землетрясений. Для исследования метода Ирикуры автором диссертации составлен реализующий его компьютерный алгоритм и опробован на опубликованных цифровых записях сильного землетрясения в Италии (Л'Аквила, 06.04.2009) и его афтершоков.

Затем автор представляет попытку адаптировать метод Ирикуры к синтезированию искусственных акселерограмм для морских площадок с использованием реальных записей землетрясений малых энергий. Успешная разработка такого подхода может позволить учитывать при расчетном моделировании сейсмических воздействий специфику сейсмогрунтовых условий площадки в случае её недостаточной изученности инженерно-геологическими и геофизическими методами, что чрезвычайно важно для работ по СМР площадок на шельфе и труднодоступных наземных площадок. Соискатель исходит из того, что при регистрации очень слабых морских землетрясений чаще всего удается достаточно надежно определить только магнитуду и пространственное положение очага. В связи с этим, он предлагает ряд модификаций метода Ирикуры, привлекает для описания очага землетрясения дополнительные корреляционные соотношения, позволяющие ввести независимым образом недостающие характеристики очага в расчет прогнозируемых акселерограмм. Однако пробное применение модифицированного метода Ирикуры с прямым использованием реальных записей привело к неадекватным результатам, что объяснимо отсутствием данных о механизме и параметрах очага, небольшим уровнем отношения «сигнал-шум» на записях очень слабых землетрясений и некоторыми другими причинами, приводящими к росту искажений в модельном расчете. В связи с этим, автором была предложена предварительная обработка реальных записей, используемых в качестве эмпирической функции Грина, состоящая в сглаживании комплексных спектров Фурье (то есть, не только амплитудных, но и фазовых спектров) и последующем обратном преобразовании для расчета новых функций Грина. Эта простая процедура привела, как показано в данной главе на примере записей сильного землетрясения в Л'Аквила и существенно более слабого землетрясения в его окрестности, к уменьшению различий в спектрах рассчитанных (синтезированных) акселерограмм и реальных записей в инженерно-сейсмологическом диапазоне частот – от 0.1 до 10 Гц. К сожалению, у автора не было возможности опробовать алгоритм непосредственно на

записях донных станций, полученных на шельфе, в связи с отсутствием записей сильных локальных землетрясений.

Учитывая особенности получения записей землетрясений при морских сейсмологических наблюдениях, соискатель сформулировал набор необходимых преобразований исходных данных и построил схему алгоритма расчета искусственных акселерограмм на шельфе методом эмпирической функции Грина. Учет специфики морских наблюдений привел к введению в расчетную схему дополнительных преобразований данных, приближенных оценок и допущений. Апробация этого алгоритма – вероятный предмет дальнейших исследований.

В данной главе автор приводит также описание расчетных методов количественной оценки отклика слоистой грунтовой толщи площадок на шельфе для получения локализованных оценок величин интенсивности сейсмических колебаний при проектных землетрясениях и соответствующих локализованных параметров расчетных сейсмических воздействий.

Сначала рассматривается метод сейсмических жесткостей (МСЖ), являющийся устаревшим, не соответствующим потребностям проектирования современных сейсмостойких зданий и сооружений, но традиционно применяемый не только в случаях, когда его использование допустимо и целесообразно, но и для таких площадок и проектов, для которых его использование дает совершенно недостаточные и неадекватные результаты.

Затем автор описывает основы алгоритма нелинейного анализа отклика грунта, реализованного в известной программе NERA, и проводит сравнение оценок отклика грунта, полученных с помощью МСЖ и NERA, на трех простых тестовых моделях строения грунтовой толщи. В результате соискатель приходит к очевидному выводу о том, что нелинейный анализ NERA учитывает эффект насыщения амплитуд сейсмических волн, резонансы и частотную зависимость сейсмического эффекта на поверхности грунта, а линейный анализ полуэмпирического МСЖ не позволяет этого учитывать, за исключением грубых, дискретных (по частоте) оценок резонансных свойств слоистой толщи, да и то только при отсутствии в ее строении скоростных инверсий.

Поскольку, в отличие от наземных площадок, грунты площадок на морском и океаническом шельфе в абсолютном большинстве случаев являются водонасыщенными и пористыми, автор естественным образом пришел к рассматриваемой далее в данной главе задаче численного моделирования отклика грунтов на шельфе с учетом их пористости и водонасыщенности. Для решения этой задачи соискатель разработал алгоритм численного моделирования отклика пористой водонасыщенной

среды на сейсмические воздействия, объединяющий технологию такого расчета для нелинейных сред (по NERA) и положения теории пористой среды Био (с допущениями по Гассману). Автору удалось подменить в алгоритме NERA уравнения движения частиц среды при распространении поперечных SH-волн уравнениями Био движения пористой среды. Разработанный алгоритм опробован с использованием записей донных сейсмостанций и результатов инженерно-геологических изысканий, полученных на шельфе Черного моря. Сравнение волновых форм, спектров Фурье и спектров реакции S-волны смоделированной акселерограммы и реальной записи землетрясения, полученной донной станцией на шельфе показало их подобие. Полученное небольшое смещение резонансного пика на спектрах может быть обусловлено ошибкой в определении мощности грунтового слоя непосредственно под сейсмографом.

С помощью разработанного алгоритма численного моделирования отклика пористой водонасыщенной среды автором проведен сравнительный анализ сейсмического отклика связных и несвязных (глинистых, песчаных и илистых) грунтов, характерных для суши и для шельфа. Выявленную разницу в поведении спектров для песчаных и глинистых грунтов автор объясняет тем, что для илистых грунтов происходит большее падение объемной сейсмической жесткости грунта с увеличением влажности. Как и для грунтов на суше, в обводненных грунтах на шельфе в модели грунтовой толщи наблюдаются эффекты резонансов и насыщения амплитуд сейсмических колебаний.

Таким образом, в данной главе приводятся обоснования второго, третьего и четвертого защищаемых положений:

- Предварительное сглаживание комплексного спектра Фурье функции Грина методом скользящего среднего приводит к снижению ее стохастичности и позволяет использовать эмпирическую функцию Грина для расчета искусственных акселерограмм проектных землетрясений для шельфовых районов в частотном диапазоне 0,1-10 Гц.
- Применение положений теории пороупругой среды Био для сейсмического диапазона частот дает возможность для численного моделирования отклика водонасыщенного грунта на сейсмические воздействия посредством нелинейного анализа в условиях недостатка инженерно-геологических данных на шельфе.
- В рамках принятой модели строения связных и несвязных грунтов полученная с помощью численного моделирования сейсмическая реакция грунтов с разными значениями влажности, включая эффекты резонансов и насыщения

амплитуд колебаний, объясняется изменением объемной сейсмической жесткости среды.

Научная новизна результатов, полученных соискателем определяется предложенным впервые в практике морских инструментальных сейсмологических наблюдений эффективным способом автоматизированного обнаружения землетрясений на записях локальных сетей донных сейсмостанций; разработанным впервые способом предварительной обработки эмпирической функции Грина для расчетов в рамках СМР в том случае, когда в качестве нее используются записи морских микроземлетрясений; предложенным новым методом моделирования влияния пористой водонасыщенной среды на сейсмические колебания, использующим нелинейный анализ и теорию Био; предложенным новым способом численного моделирования реакции грунтов на сейсмические воздействия в рамках принятой модели строения и свойств связных и несвязных грунтов суши и шельфа.

Актуальность и прикладная значимость полученных результатов связана с интенсивным освоением морского шельфа для добычи и первичной переработки полезных ископаемых, строительством морских нефте- и газодобывающих платформ, причальных и инфраструктурных сооружений, требующих оценок сейсмической опасности и задания надежных характеристик расчетных (проектных) сейсмических воздействий с учетом специфики сейсмогрунтовых условий площадок на шельфе.

Замечания и комментарии оппонента.

1. Следует отметить, что автор неоднократно ссылается на положения нормативов СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах», в то время как действующим является обновленный и переработанный на базе упомянутого СНиП'a нормативный документ СП 14.13330.2014. Кроме этого, вместо нормативных карт общего сейсмического районирования ОСР-97 введены карты ОСР-2015.
2. В диссертации не упомянуты пионерные в отечественной и мировой морской сейсмологии аппаратурные и методические разработки и научные исследования члена-корреспондента РАН Л.Н. Рыкунова (1928—1999) и его сотрудников.
3. При описании способа оценки магнитуды землетрясения по длительности колебаний не учтены результаты отечественных исследований, полученные С.У. Кухмазовым.
4. Не всегда расшифровано значение и определен смысл величин, входящих в приведенные формулы, например, множитель P_3 в формуле (2.1.2), переменная e в формуле (3.4.13) и т.п.

5. В подписи к рисунку 3.4.7, вероятно, вместо «слоя мягкой глины мощностью 5,5 м» должно быть «слоя мягкой глины мощностью 14 м»
6. Нет пояснений, на чем основана коррекция параметров пылеватого и гравелистого песков в формулах (3.4.22) и (3.4.23), как получены новые коэффициенты в формулах.
7. При сопоставлении результатов расчетов по МСЖ и NERA (раздел 3.3.3) на рисунке 3.3.5а «...показаны результаты оценки приращения интенсивности за счет резонансов по формулам (3.3.2)-(3.3.3) для разных мощностей слоя мягкой глины и разной интенсивности исходных воздействий». Возможно, допущена ошибка в подписи на оси абсцисс рисунка 3.3.5а. Но, в любом случае, в методе сейсмических жесткостей нет *в принципе* учета зависимости приращений сейсмической интенсивности от интенсивности исходных воздействий. Не ясно, что же сравнивается на рисунке 3.3.5?
8. При адаптации методов Ирикуры и NERA+Био к условиям оценки искусственных акселерограмм и спектров реакции для площадки на шельфе автор вводит значительное количество дополнительных (сторонних) корреляционных соотношений между характеристиками очага, динамики разрыва и свойств грунта, а также других допущений. Возникает вопрос: как соотносятся уточнения, достигнутые с помощью эмпирической функции Грина (в частности, с ее сглаживанием), с помощью введения описания пористой среды в нелинейный анализ при локализации сейсмических воздействий с возможными искажениями, вносимыми неопределенностями и погрешностями корреляционных соотношений и других допущений? Можно предположить, что этот весьма сложный вопрос может стать одним из предметов дальнейших исследований.
9. Не стоит преувеличивать возможности широко используемых расчетных методов оценки влияния грунтовой толщи на сейсмические колебаний (МСЖ, EERA, NERA и др.) все они построены для моделей горизонтально-слоистых сред с идеализированными границами. Для природной неоднородной среды, зачастую с нечеткими границами раздела слоев и, особенно, в случаях сложного рельефа внутренних межслойных границ и/или рельефа свободной поверхности грунта они приводят к существенным искажениям или вообще неприменимы для учета грунтовых и сеймотектонических условий площадок.

В целом, диссертационная работа А.А. Крылова является завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованием


ВАК и выполненным на высоком научном уровне. Приведенные в работе результаты следует определить как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно, на хорошем русском языке, аккуратно оформлена и иллюстрирована. В своей диссертации А.А. Крылов продемонстрировал высокий уровень знания специальных вопросов сейсмологии, геофизики и инженерной геологии, а также свое умение использовать эти знания для решения конкретных научных проблем.

Приведенные выше замечания не являются существенными для оценки качества диссертационной работы и уровня квалификации соискателя.

В автореферате диссертации в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор А.А. Крылов заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Заместитель директора ЦСГНЭО –
филиала АО «Институт Гидропроект»,
кандидат физико-математических наук,
член технического комитета
по сейсмическим вопросам
проектирования плотин
Международной комиссии
по большим плотинам (ICOLD)

 Бугаевский А.Г.
10 ноября 2016 г.

Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.2; e-mail: bugaevskiy@geodyn.ru; телефон: 8 (499) 155-0577/

Полное наименование организации: Филиал Акционерного общества «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я. Жука» – «Центр службы геодинимических наблюдений в энергетической отрасли»

Я. Бугаевский Алексей Геннадьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

*Будниев Бугаевского А.Г.
заверяю: вер. илл. ОК*



Бугаевский А.Г.