

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Спиридонова Евгения Александровича «Новые методы моделирования земных приливов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа Евгения Александровича Спиридонова посвящена разработке современной теории земных приливов. Эта работа является прямым продолжением классических трудов Михаила Сергеевича Молоденского, таких как “Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли” 1953 года и “Числа Лява для статических земных приливов 2-го и 3-го порядков” 1961 года. Полученная в этих работах система дифференциальных уравнений 6 порядка обобщена автором диссертации на случай вращающейся эллипсоидальной Земли. Представленная в диссертации современная методика расчета океанического гравиметрического эффекта успешно развивает известные в нашей стране многочисленные работы на эту тему Бориса Петровича Перцева.

Актуальность темы диссертации в первую очередь определяется новизной полученных в ней методик расчета приливных параметров. Эти методики не имеют аналогов в нашей стране и за рубежом, как с точки зрения реализуемых подходов, так и точности приведенных оценок, подтвержденных путем сравнения теоретических результатов с данными наиболее высокоточных гравиметрических наблюдений.

Приведенные в диссертации результаты обладают широким спектром применения в современных геофизических и геодезических исследованиях. В связи с этим следует отметить, что в последние годы изучение земных приливов и вращения Земли играет все большую роль в программе геодинамических исследований. Связано это с внедрением новых средств геодезических и астрометрических наблюдений (сверхпроводящих и абсолютных гравиметров нового поколения, радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, спутниковой альтиметрии и Глобальных спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС и GPS)). Высокая точность этих средств требует, с одной стороны, весьма надежного исключения теоретического гравитационного прилива, а также знания приливных смещений, наклонов и деформаций, а с другой – открывает новые возможности изучения внутреннего строения Земли, поиска полезных ископаемых, улучшения качества систем координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО), а также теорий прецессии и нутации. В рамках национальных и международных программ на современном этапе проводятся значительные работы по созданию и модернизации гравиметрических полигонов, исследованию неприливных изменений силы тяжести и океанических приливных

эффектов, осуществляются гравиметрические съемки на суше, в открытом море и на шельфе. Приведенные в работе новые значения чисел Лява и амплитудных дельта-факторов приливных волн и достигнутая возможность расчета рядов приливных параметров, безусловно, направлены на решение указанных актуальных задач. Помимо этого, полученные в работе результаты могут способствовать дальнейшему развитию опорной гравиметрической сети нашей страны, которая в настоящее время содержит фундаментальные пункты и строится на трех независимых методах измерения силы тяжести. Все это говорит о безусловной актуальности представленной диссертационной работы.

Говоря о работе в целом, отмечу следующее:

Диссертантом получены значения амплитудных дельта-факторов и чисел Лява приливных волн для Земли без океана с учетом их зависимости от широты. Эти зависимости, как следует из текста работы, определяются эллиптичностью мантии Земли, а также действием центробежных и кориолисовых сил. Их учет приводит к заметному уточнению параметров земных приливов, вплоть до сотых долей процента. В то же время, вычисление указанных широтных зависимостей проведено в нашей стране впервые. Основной же отличительной чертой обсуждаемой работы от работ зарубежных авторов, в этой связи, является то, что зависимости чисел Лява от широты не назначаются для различных типов приливных волн автором заранее, а вычисляются в ходе интегрирования полученной системы дифференциальных уравнений. Т.е. задача вычисления чисел Лява для Земли без океана решена автором в наиболее общем виде.

В работе подробно рассмотрено влияние на получаемые значения чисел Лява широкой группы факторов, таких как: выбор модели строения Земли и формы земной поверхности, учет диссипации приливной энергии в мантии Земли, относительных, центробежных и кориолисовых ускорений, негидростатичности, а также полученного в работе специфического сдвигового нормального напряжения. Интересным, в частности, является результат, согласно которому амплитудные дельта-факторы суточных и полусуточных приливных волн для невращающейся эллипсоидальной Земли практически перестают зависеть от широты при введении центробежной силы и вновь приобретают заметный широтный ход после включения в рассмотрение силы Кориолиса. Приведенные диссертантом рабочие модели, в которых произведен учет всех перечисленных выше факторов, значимо отличаются от моделей известных зарубежных авторов. Показано, что результаты основной модели 9 лучше соответствуют данным гравиметрических наблюдений, полученных на сети сверхпроводящих гравиметров Глобального геодинамического проекта, нежели модели наиболее известных зарубежных авторов.

Большое внимание в диссертации уделено уточнению методик расчета океанического гравиметрического эффекта. Помимо учета уже перечисленного набора факторов, влияющих на результаты расчета как

обычных, так и нагрузочных чисел Лява, предназначенных для расчета океанической нагрузки, диссертантом внесен ряд усовершенствований в расчет самого обсуждаемого эффекта. В частности, показано, что к лучшим результатам приводит отказ от массовой коррекции высоты прилива, т.е. введение этой поправки искажает данные котидальных карт приливных океанических моделей. Для разложения высоты прилива по сферическим функциям предложен оригинальный метод, основанный на применении рекуррентных формул не для самих полиномов Лежандра, а сразу для интегралов от них, взятых по элементарным сферическим площадкам. И, наконец, автор ушел от распространенной во всем мире методики, основанной на применении функций Грина и ближней зоны. Океанический прилив раскладывается по сферическим функциям по сетке всего земного шара с той же степенью подробности, что и в ближней зоне в работах других авторов. Последнее особенно важно, поскольку производится более точный учет глобальной нагрузки, которая вносит основной вклад в исследуемый океанический эффект. Введение ближней зоны в других работах в основном способствовало уточнению эффекта прямого (ньютоновского) притяжения, которое, обычно, как минимум на порядок меньше нагрузочной части. В то же время, эффект притяжения также рассчитан диссертантом с высокой степенью точности. Это следует из того, что разложение основной применяемой в работе океанической приливной модели FES2012 велось до 1120 порядка. Комплексность подхода, реализованного при создании методики расчета океанического эффекта, а также новизна примененных методов делают эту методику отличной от известных работ отечественных и зарубежных авторов и превосходящей полученные ранее результаты по точности. Последнее следует, в том числе, из сравнения таблиц 3.1.2 и 3.1.3, в которых представлены наблюдаемые и предвычисленные (прогнозные) амплитудные дельта факторы и сдвиги фаз приливных волн. Приведенные в этих таблицах сдвиги фаз отличаются зачастую лишь на сотые доли градуса, приближаясь к значениям, обусловленным диссипацией.

Важным достоинством разработанных в диссертации методов является то, что они реализованы не только в виде аналитических формул, которые доступны только узким специалистам, но и в численном виде, т.е. в виде программы прогноза параметров земных приливов ATLANTIDA3.1\_2014, установленной на программно-аппаратные средства и применяемой в настоящее время специалистами и организациями по всему миру.

Обозначенные в работе цель и задачи, а также защищаемые положения полностью соответствуют предмету исследования, а также содержанию работы. Представленный автором перечень работ по теме диссертации, опубликованных в журналах ВАК, полностью отражает его личный вклад в выносимую на защиту работу.

По теме диссертации ее автором написано 24 статьи. 14 из них опубликованы в журналах, входящих в список ВАК. Помимо этого, диссертанту принадлежит патент на прикладную программу,

реализующую представленные в диссертации теоретические разработки. Результаты работы докладывались более чем на 10 отечественных и зарубежных конференциях и симпозиумах.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 231 страница, из них 214 страниц текста, включая 85 рисунков и 30 таблиц. Список литературы содержит 116 наименований на 17 страницах.

Во введении автор указывает цель и обосновывает актуальность, новизну и практическую значимость работы, перечисляет решаемые задачи и делает краткий обзор исследований в области, соответствующей теме диссертации.

#### Замечания к введению:

1. При обсуждении практической значимости работы (стр. 7, 8) допущено применение англоязычного сокращения *GNSS*. Несмотря на его частичную расшифровку в скобках, данное сокращение не является общепринятым в отечественной литературе. Общепринятым является сокращение ГНСС. Также неудачно обозначение латинскими буквами названия отечественного абсолютного гравиметра ГАБЛ.
2. При обсуждении работ, посвященных расчету нагрузочных чисел Лява, последняя по времени ссылка относится к работе Босса и других 2002 года. Однако существуют и более поздние работы на эту тему, например: L. Metivier, M. Greff-Lefftz and M. Diament. *Mantle lateral variations and elastogravitational deformations – I. Numerical modelling. Geophys. J. Int.* (2006) 167, 1060–1076.

В первой главе приводятся основные теоретические результаты работы. Выписана система обыкновенных дифференциальных уравнений шестого порядка, описывающая деформированное состояние сжимаемой гравитирующей оболочки, приведен метод численного интегрирования полученной краевой задачи, показаны формулы для расчета нагрузочной и ньютоновской составляющих океанического гравиметрического эффекта, выписаны рекуррентные формулы для интегралов от полиномов и присоединенных полиномов Лежандра, предназначенные для разложения высот океанического прилива по сферическим функциям, рассмотрены вопросы введения в расчет океанического эффекта массовой коррекции и поправки за высоту станции.

#### Замечания к первой главе:

3. Формулы (1.1.7) на стр. 25 выражают лишь сдвиговую часть тензора напряжений. Однако из предшествующего этой формуле текста этого не следует. Выражения (1.1.7) названы просто “тензор напряжений”.
4. В формуле (1.1.9) не совсем удачно обозначать одну из искомым функций  $T$  и тензор напряжений практически той же буквой.
5. На стр. 55-59 для написания формул применен иной шрифт, нежели во всей остальной работе.
6. В разделе 1.1.7 дано краткое описание применяемых в работе моделей строения Земли. В частности, помимо PREM, применяется модель IASP91. В связи с этим, не совсем понятно,

почему автор не применяет в своей работе более поздние модели строения, например, такую, как АК135-F, созданную группой разработчиков IASP91 на 4 года позже?

Во второй главе автор приводит основные результаты проведенных в работе численных расчетов, проводит сравнение полученных значений с работами других авторов. Прежде всего, в этой главе представлены значения чисел Лява и амплитудных факторов. Также приведены значения нагрузочных коэффициентов. Показаны возможности разработанной диссертантом программы прогноза параметров Земных приливов ATLANTIDA3.1\_2014.

Замечания ко второй главе:

7. В разделах 2.4-2.8 достаточно подробно рассмотрены результаты расчета океанического гравиметрического эффекта. Однако, обсуждается максимум для 8 приливных волн, в то время как современные океанические приливные модели работают с существенно большим их числом.
8. Все результаты главы относятся только к гравиметрическому эффекту. Какое-либо обсуждение результатов для приливных наклонов, смещений и деформаций, а также изменения потенциала полностью отсутствуют.
9. Во второй главе, как и во всей работе, совсем не обсуждается атмосферная нагрузка. В то же время, например, поле атмосферного давления может вносить существенные коррективы в результаты тех же гравиметрических наблюдений, включая в отдельных случаях дальнюю зону радиусом порядка 2 тысяч километров. Существенные поправки вносит атмосфера также и в данные измерений смещений, наклонов и деформаций.

В третьей главе представлено сравнение численных результатов, полученных в настоящей работе, с данными гравиметрических наблюдений. По итогам этой главы сделан вывод о том, что полученные в диссертации прогнозные значения амплитудных дельта-факторов и сдвигов фаз приливных волн по различным критериям почти в 70% случаев приводят к меньшим отклонениям от результатов наблюдений, нежели аналогичные значения, рассчитанные другими авторами.

Замечания к третьей главе:

10. Название раздела 3.7 “Зависимость океанического нагрузочного эффекта от широты” не соответствует его содержанию. Фактически, речь в разделе идет о вкладе в океанический эффект широтной зависимости нагрузочных чисел Лява.
11. На стр. 208 в тексте вывода 7 к третьей главе упоминается раздел этой главы 3.9. Однако в третьей главе диссертации этот раздел отсутствует.

В **Заключении** перечислены основные результаты и выводы работы. Выводы сформулированы четко и ясно и соответствуют как тексту работы, так и основным защищаемым положениям.

Отмеченные выше недостатки не умаляют достоинств диссертации Е. А. Спиридонова. Она подводит итог его многолетней работе, представляет собой

выполненное на высоком научном уровне полное и законченное фундаментальное исследование. Основные результаты оригинальны и имеют большую практическую значимость. Они получены путем строгих математических методов и аккуратных числовых оценок, сравнения с данными современных гравиметрических наблюдений; их достоверность не вызывает сомнений.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК.

Результаты диссертации представляют большой интерес не только для геофизики и геофизическим методам поиска полезных ископаемых, но для астрономии, гравиметрии и космической геодезии.

На основании вышеизложенного, считаю, что диссертация Спиридонова Е.А. «Новые методы моделирования земных приливов» соответствует критериям, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени доктора наук, а ее автор Евгений Александрович Спиридонов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Я, Сидоренков Николай Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Сидоренков Николай Сергеевич,

123242 Москва, Б. Предтеченский пер., дом 11-13; тел. +74997952152;

sidorenkov37@mail.ru; ФГБУ Гидрометеорологический научно

исследовательский центр Российской Федерации; Заведующий лабораторией планетарной циркуляции и гелиогеофизических исследований

Доктор физико-математических наук; старший научный сотрудник

Н.С.Сидоренков

Подпись Н.С.Сидоренкова заверяю

Ученый секретарь Гидрометцентра

России

кандидат физико-математических наук

Н.А.Шестакова

