

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертационную работу Лебедева Сергея Анатольевича**  
**«Спутниковая альтиметрия Каспийского моря»,**  
**представленную на соискание ученой степени**  
**доктора физико-математических наук**  
**по специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросфера».**

Диссертационная работа Лебедева Сергея Анатольевича посвящена разработке новых и усовершенствования уже существующих методов обработки альтиметрических измерений для изучения гидрометеорологического и гидродинамического режимов Каспийского моря.

Представленная работа является **актуальной** как в научном, так и в практическом плане, что связано с необходимостью мониторинга основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря (уровня, скорости приводного ветра и высот ветровых волн) и динамики моря по данным спутниковой альтиметрии для решения практических задач оценок воздействия на окружающую среду при строительстве нефтедобывающих платформ на акватории моря/залива и береговых сооружений, для обеспечения безопасности судоходства и проведения фундаментальных региональных климатических исследований.

Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка сокращений, приложения, изложена на 350 страницах, включая список литературы, который содержит 523 ссылки преимущественно на англоязычные публикации (302 ссылки). Работа содержит 24 таблицы и 150 рисунков.

Во **Введении** определяется цель исследования, раскрывается актуальность диссертационной работы, формулируются задачи, раскрывается научная новизна и практическая значимость, описывается структура работы и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава – обзорная**, содержащая отражающие современный уровень знаний результаты исследований гидрометеорологического и гидродинамического режимов Каспийского моря. Приводятся сведения о водном балансе моря, об уровне моря – многолетняя, сезонная и короткопериодная изменчивость его, ветровых условиях и ветровом волнении, развития ледовых процессов и циркуляции вод в разных частях моря, полученные по данным инструментальных измерений на метеорологических станциях, уровенных и волномерных постах, расположенных вдоль побережья моря. Фактически, автор в этой главе

очерчивает круг задач исследования Каспийского моря, где спутниковая альтиметрия может быть эффективно применена. Для любых моделей гидрологического и гидродинамического режима Каспия требуется исходная информация, данные наблюдений, и именно измерения, полученные с помощью СА, могут существенно расширить имеющуюся базу данных. Анализируя современную ситуацию с получением натурных данных за перечисленными выше процессами, автор отмечает недостатки: невысокая точность измерений, в первую очередь – процессов, действующих в открытом море (волнение, ветровые поля), морально устаревшее оборудование, отсутствие единой системы высот для уровенных постов, отсутствие оценок влияния современных вертикальные движения земной коры в Каспийском регионе на морфометрию моря. Такое положение приводит к выводу о необходимости привлечения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в частности спутниковой альтиметрии (СА), для мониторинга основных гидрометеорологических параметров (скорости приводного ветра, высоты ветровых волн и уровня) Каспийского моря.

**Вторая глава** является детальным описанием метода спутниковой альтиметрии как одного из активных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Соискатель, в согласии с мнением ряда исследователей, отмечает три этапа развития СА: 1974-1980 гг., 1985-1992 гг. и с 1992 г. – по настоящее время. Приведены краткие описания российских и зарубежных основных программ – выполненных и выполняемых – спутниковых альтиметрических измерений. Особое внимание уделено описанию изомаршрутных программ, направленных на осуществление мониторинга изменчивости высоты морской поверхности – что актуально для СА Каспийского моря. Изложение иллюстрируется карто-схемами расположения треков (подспутниковых трасс) на акватории Каспия.

Подробно излагаются методико-технологические основы спутниковой альтиметрии: геометрия метода альтиметрических измерений, физические основы метода (рабочая частота альтиметра, диаграмма направленности антенны альтиметра, определение расстояния от альтиметра до подстилающей поверхности, площадь сегмента отражения). Приведен обзор методов представления и анализа формы отражения радиолокационного импульса альтиметра, рассмотрены модели, точнее, плотности распределения вероятностей высоты волн (распределения Гаусса, Грама-Шалье, комбинированная модель, модель Хоу), модели (теоретические, полуэмпирические и эмпирические) расчета скорости приводного ветра на высоте 10 м. Нетривиальность расчетов измерений взволнованной морской поверхности, получаемых методами СА, проявляется, в частности, в необходимости учета целого ряда поправок: на влияние атмосферы вследствие рассеяния и поглощения радиоимпульса – «сухой» тропосферной поправки на рассеяние радиоимпульса, на влажность воздуха, влияющей на поглощение радиоимпульса, ионосферной поправки на рассеяние радиоимпульса свободными электронами и ионами. Поправки должны также

учитывать состояние подстилающей поверхности – на электромагнитное смещение, вызывающее изменение интенсивности отражения радиоволн вдоль профиля длинных поверхностных волн (гребни волн отражают зондирующий импульс слабее, чем впадины) и асимметрию возвышения морской поверхности (негауссовость плотности распределения вероятности высот волн). К числу геофизических поправок отнесены поправка обратного барометра, приливные поправки – морские и земные, полюсные приливы, поправки за счет нагрузки на ложе океанов и морей. С альтиметром связана поправка на отклонение альтиметра от положения надира и инструментальная поправка.

Раздел (2.13) посвящен примерам использования СА в науках о Земле: в геодезии и гравиметрии, в исследовании Мирового океана, геологии, океанологии, гляциологии, гидрологии, ландшафтovedении.

Представляется, что содержание второй главы может оказаться полезным для использования в учебно-методических целях при подготовке специалистов в области спутниковой альтиметрии.

**В третьей главе** подробно рассматриваются методы обработки данных спутниковой альтиметрии применительно к акватории Каспийского моря. Обосновываются причины выбора для анализа гидрологического и гидродинамического режимов моря альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1-2. Соискателем предложены специальные алгоритмы расчета основных поправок («сухая» тропосферная поправка, поправка на влажность и ионосферная поправка), необходимых для обработки данных альтиметрических измерений на акватории Каспийского моря с учетом гидрометеорологического режима и морфометрии моря. Для оценки ошибки в расчетах поправки на «сухую» атмосферу использовались данные, полученные при выполнении дрифтерного эксперимента на Каспийском море, проведенного в 2006 г. в рамках международного проекта «Междисциплинарный анализ экосистемы Каспийского моря». Приводятся и обсуждаются формулы для поправок на влажность атмосферы, ионосферную поправку, поправку на состояние подстилающей поверхности. Отмечается, что из геофизических поправок для Каспийского моря учитываются также поправки на земные и полюсные приливы. Показано, что разность между измерениями спутников Т/Р и J1в среднем составляет около 10 см, что приводит к необходимости учитывать это обстоятельство при объединении данных дистанционного зондирования в единый временной ряд.

Приведены примеры расчета скорости приводного ветра на высоте 10 м над акваторией Каспия и изменчивости высоты морских волн на Каспии по данным спутников J1, J2 и TOPEX-Poseidon.

Диссертант обосновывает и разрабатывает алгоритм регионального адаптивного ретрекинга. При обработке данных СА, полученных для прибрежной зоны (океанов, морей, внутренних водоемов) возникают проблемы, связанные с тем, что форма телеметрического импульса, принимаемых антенной альтиметра, существенно отличается от импульсов,

формирующихся в открытом океане вдали от суши-побережья. В прибрежной зоне отражение импульса от морской поверхности искажается отражением импульса от поверхности суши. Поэтому необходима разработка соответствующего алгоритма, что и было выполнено соискателем в сотрудничестве с его коллегами. Этот алгоритм состоит из следующих основных шагов: создание кусочно-постоянной топографической модели засвеченной импульсами зоны; решение прямой задачи определения модельных волновых форм на основе построенной топографической модели; выбор и назначение критериев отбора телеметрических импульсов (своего рода фильтрация сигнала); пошаговое решение обратной задачи посредством порогового и улучшенного порогового ретрекинга.

Разработанный алгоритм регионального адаптивного ретрекинга вначале был применен при исследовании гидрологического режима Горьковского водохранилища. При этом использовался опыт соискателя по применению СА для определения уровня воды в низовьях Волги. Опыт применения алгоритмов расчета ВМП, разработанных для океанов и больших морских акваторий показал, что такие алгоритмы дают значительные ошибки и, следовательно, требуется применение алгоритма, учитывающего влияния отражения от суши, сопутствующих прибрежных сливов и искажений телеметрических импульсов сильно отражающими объектами. В таком алгоритме существенно использование топографии побережья водного объекта, что приводит к необходимости построения кусочно-постоянной модели подстилающей поверхности на побережье.

Алгоритм регионального адаптивного ретрекинга был применен для измерений методами СА уровня воды в других волжских водохранилищах – Рыбинского Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского. Полученные результаты показали улучшение качества измерений при использовании регионального адаптивного ретрекинга. Коэффициенты взаимной корреляции между измерениями СА и данными гидропостов увеличились и среднеквадратичные отклонения (от данных гидропостов) уменьшились по сравнению с результатами применения стандартного алгоритма для всех исследованных водохранилищ.

Опыта применения алгоритма регионального адаптивного ретрекинга для волжских водохранилищ был использован для получения данных об изменчивости уровня Каспия в прибрежной зоне.

**Глава четвертая** посвящена особенностям данных спутниковой альtimетрии. Рассмотрены основные типы данных (оперативные, промежуточные и окончательные), структура, виды и особенности баз данных СА.

Подробно описывается структура построения Интегрированных баз данных спутниковой альтиметрии для Мирового океана и Каспийского моря и излагается принцип интегрированности при формировании этих баз. Сам принцип интегрированности предполагает включение в СУБД программного обеспечения, задача которого сводится к интерполяции данных модельных

расчетов, представляющих собой численные поля на регулярной сетке или коэффициенты разложения на гармонические составляющие для морских приливов или коэффициенты разложения по сферическим функциям для геопотенциала, в точку, где непосредственно проводятся альтиметрические измерения.

ИБДСА «Каспий» формировалась с выделением данных отдельно по акватории Каспия и по заливу Кара-Богаз-Гол, учитывая различия в их гидрологическом и гидродинамическом режимах.

ИБДСА для Мирового океана и ИБДСА «Каспий» зарегистрированы в Государственном регистре баз данных в 1999 г. и 2005 г.

**Пятая глава** посвящена исследованию синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости основных гидрометеорологических процессов – колебаний уровня, скорости приводного ветра и высот ветровых волн Каспийского моря по объединенным данным альтиметрических измерений.

Применительно к данным по колебаниям уровня Каспия, соискателем получен и проанализирован ряд наблюдений, полученный по данным телеметрических измерений спутников Т/Р и J1 за период с января 1993 по 2012 г. Проанализирована важная характеристика репрезентативности альтиметрических измерений уровня – коэффициент взаимной корреляции данных СА и наблюдений на уровенных постах. Практически для всех точек наблюдения, этот коэффициент превышал 0.9, что, по мнению соискателя, подтверждает репрезентативность данных по колебаниям уровня Каспия, полученных с помощью СА, в силу чего эти данные могут быть использованы для инженерных расчетов.

Существенно, что соискатель получил данные по изменчивости уровня залива Кара-Богаз-Гол, причем и для нестационарного режима заполнения залива после разрушения дамбы в проливе, соединяющего море и залив. Отток морской воды в залив играет заметную демпфирующую роль в механизме колебаний уровня Каспия. В стационарных условиях отток в Кара-Богаз-Гол зависит от перепада уровней между морем и заливом, поэтому данные по колебаниям уровня воды в море, и в заливе (1993–2012 гг.) имеют несомненную научную и прикладную значимость.

Данные по сезонным колебаниям уровня по данным СА дифференцируются по районам акватории Каспия (Северный, Средний и Южный Каспий) получены за период сентябрь 1992 – 2012 гг. и для залива Кара-Богаз-Гол – за январь 1996 – декабрь 2012 гг. Анализируя полученные данные, соискатель приходит к выводу о том, что СА позволяет детально исследовать пространственную изменчивость сезонных колебания уровня по всей акватории моря.

Принципиальным моментом в использовании данных СА является возможность проведения анализа пространственно-временной изменчивости ветрового режима над мористой частью акватории Каспия. Первым шагом в обработке и интерпретации измерений СА является верификация альтиметрических данных по данным береговых метеостанций. Кроме того,

соискатель привлекает также сравнение данных СА с результатами расчетов по модели циркуляции атмосферы ECMWF и по измерениям микроволнового радиометра и приходит к выводу о том, что данные СА хорошо согласуются с данными метеостанций и модели ECMWF.

Соискатель приводит результаты детального анализа данных СА по изменчивости разных масштабов скорости приводного ветра над акваторией Каспия. Рассмотрена синоптическая, сезонная и межгодовая изменчивость ветровых полей. Полученные результаты представлены в виде ряда карто-схем. Приведены карто-схемы: средней скорости приводного ветра, повторяемости скорости приводного метра более 8 м/с для усредненных по всему периоду наблюдений и для усредненной по месяцам скорости ветра (январь, март, июль, октябрь) для периода (сентябрь 1992 – декабрь 2012 гг.), карто-схема тенденций межгодовой изменчивости скорости приводного ветра.

Применительно к исследованиям многолетнего уровенного режима Каспия, особый интерес представляет график межгодовой изменчивости скорости приводного ветра над различными частями Каспия и моря в целом.

Последовательность действий, излагаемая соискателем по получению информации о ветровом волнении на Каспии по данным СА, аналогична таковой для приводной скорости ветра. Вначале проводится верификация данных СА по данным прямых измерений и результатам расчетов моделирования ветрового волнения на Каспийском море (спектральная модель WaveWatch III). Соискатель приходит к выводу о том, что высоты волн по данным СА близки к модельным данным, при этом расхождение с береговыми измерениями достигает 60-90 см (высоты волн, определяемые по СА, меньше наблюдаемых высот на эту величину).

Результатом детального анализа данных СА по изменчивости высоты ветровых волн на акватории Каспия является соответствующая информация в виде ряда графиков, таблиц и карто-схем: график изменчивости высоты волн по данным СА (за сентябрь 1992 – декабрь 2012 гг.), таблицы, в которых представлена статистика высоты волн, графики спектральной плотности изменчивости высоты волн, графики сезонной изменчивости высоты волн в отдельных частях Каспия, карто-схемы средней высоты и повторяемости волн – за весь рассматриваемый период наблюдений и за характерные месяцы, графики межгодовой изменчивости среднемесячной высоты волн в отдельных частях и море в целом и т.д.

В обсуждаемой главе содержатся также результаты применения методов СА для получения информации о ледовых процессах на акватории Каспия. Приведены данные о межгодовой изменчивости площади ледяного покрова Северного Каспия и продолжительности ледового периода в западной и восточной частях Каспия за сентябрь 1992 – декабрь 2012 гг. Получен вывод о противофазном характере изменчивости площади ледяного покрова Каспия и средних за зимний период высот волн на Северном Каспии.

**Шестая глава** имеет название «Гидродинамический режим Каспийского моря». Представляется, что более корректным было бы название типа «Характеристики гидродинамического режима Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии».

В шестой главе рассматривается модель средней высоты морской поверхности применительно к Каспийскому морю. Уникальность Каспийского моря – в частности, нахождение его ниже уровня Мирового океана, значительные многолетние и сгонно-нагонные колебания уровня, ледовый режим Северного (иногда – и Среднего) Каспия, сток Волги и особенности водного баланса Каспия – приводят к необходимости соответствующей региональной модели средней высоты морской поверхности (СВМП). Для построения этой модели использовались данные спутников Т/Р и J1-2 с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2012 г.

Соискателем реализован подход, в котором модель средних высот морской поверхности Каспийского моря представляет собой функцию не только широты и долготы, как это принято при построении глобальных моделей, но и времени. Она позволила впервые проанализировать не только пространственную неоднородность скорости его подъема или падения, но также межгодовую изменчивость уровня Каспия.

Значительным результатом представляется построение карто-схемы, которую условно назовем картой топографии водной поверхности Каспийского моря. Как показали данные СА, скорости изменения уровня Каспия неоднородным образом распределяются по акватории моря.

Соискателем проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости полей среднемесячной и среднесезонной синоптической динамической топографии и завихренности поля скоростей геострофических течений. Совместный анализ изменчивости среднегодовых величин скоростей течений и завихренности поля течений, рассчитанных по данным альтиметрических измерений, показывает обратную корреляцию средних скоростей течений и завихренности поля скоростей течений. В этой главе автором проведен анализ пространственной изменчивости скорости прохождения паводка реки Волга.

Полученные результаты представлены в виде графиков и карто-схем, удобных для анализа и интерпретации.

В **Заключении** соискатель приводит основные результаты диссертационной работы, всего одиннадцать позиций. В основном, можно согласиться с интерпретацией соискателем полученных результатов, однако некоторые положения Заключения, как представляется, следовало бы изложить с большей осторожностью. Например, в п.9 на первое место надо бы поставить то, что СА позволила подтвердить (а не «показать») характер циркуляции вод в море: в Южном Каспии – антициклоническая, в Северном Каспии – циклоническая. В п. 11 представляется более корректным вместо «выявить роль стока рек, осадков [...] в изменчивости уровня [Каспия]» использовать слово «уточнить», дабы не создавалось впечатления, что до

исследований соискателя эту роль никак не выявляли. Излишне оптимистичным представляется мнение соискателя (также в п.11) о том, что спутниковый мониторинг Каспия «...позволит проследить, насколько тенденция к новому падению уровня является устойчивой ...». По сути, определение тенденций в изменениях уровня Каспия – это задача прогноза климатических условий в бассейне Каспия. Спутниковый мониторинг, безусловно, будет способствовать решению этой задачи – но не является собственно решением.

Несмотря на эти замечания, полагаю, что содержание Заключения отвечает полученным результатам и дает полное представление о составе и масштабе проведенных соискателем исследований.

**В Приложении** приведен полный список публикаций автора по теме диссертации, который включает в себя: 2 монографии, 4 главы/статьи в российских научных сборниках и 4 их в зарубежных (из них 2 из системы «Web of Science» и 3 из системы «Scopus»), 12 статей в российских реферируемых журналах и 5 зарубежных (из них 11 из списка ВАК, 4 – из системы «Web of Science» и 4 – из системы «Scopus»), 20 статей в материалы и труды конференций (14 из них в трудах зарубежных конференций) и 55 тезисов конференций (46 из них тезисы зарубежных конференций).

Полученные автором результаты считаю достоверными, поскольку они подтверждаются сравнением результатов обработки данных спутниковой альтиметрии с данными инструментальных измерений на уровенных постах, гидрометеостанциях и волномерных постах. Результаты работы докладывались на большом количестве семинаров в ведущих российских и зарубежных научных центрах и представительных российских и международных конференций.

Считаю необходимым сделать некоторые замечания, в основном, редакционного характера.

1. Утверждение, что неучет вертикальных движений земной коры якобы «вносит существенную ошибку в расчеты межгодовой изменчивости уровня моря» – излишне категорично, что выражается в слове «существенно». Как раз дело-то в том, что никто не знает, какова эта ошибка, и данные СА могли бы прояснить этот вопрос.
2. Понятие «средней» скорости заполнения Кара-Богаз-Гола за 1992-1996 гг. несодержательно – данный процесс заполнения нестационарен.
3. В предложении «Впервые построена карта вероятности максимального роста или падения уровня моря» слово «вероятности» представляет, судя по соответствующему тексту в диссертации, просто опиской. Действительно, эта карта (рис. 6.6 в диссертации) имеет название «Нормированные скорости

изменений уровня Каспийского моря [и т.д.]», также и в соответствующем поясняющем тексте нет никаких упоминаний о вероятности.

4. Перед п.2.9.1 отмечается: «... необходимо учесть еще одну поправку, связанную с состоянием подстилающей поверхности, которая имеет три составляющие». На самом деле – здесь описка, в тексте диссертации рассматривается только две поправки – на электромагнитное смещение и на асимметрию возвышений морской поверхности.
5. Соискатель использует термины «оптимальный», «принципы» (при описании разработанного им алгоритма регионального адаптивного ретрекинга), как представляется, в излишне широком смысле. Вместо «оптимальный» – можно было бы сказать «усовершенствованный», вместо «принципов» –«шаги».
6. В тексте диссертации и автореферате содержатся опечатки и небрежностей («потенциальные возможности», отсутствие некоторых обозначений на рисунках и в тексте и другие редакционные недочеты).

Эти замечания, однако, не снижают высокой оценки рассмотренной диссертации, поскольку не являются существенными, искажающими смысл полученных соискателем результатов исследований.

Диссертация С.А. Лебедева представляет научно-обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в области космического мониторинга природных объектов и процессов, способствуя развитие страны в научном и прикладном аспектах. Диссертация содержит новые теоретические и научно-прикладные достижения, что позволяет ее считать полностью соответствующей требованиям к докторским диссертациям.

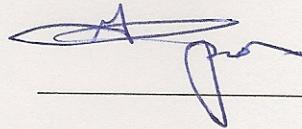
В целом считаю, что диссертация С.А. Лебедева является законченным научным трудом, в котором разработана и существенно усовершенствована технология обработки данных спутниковой альтиметрии. Соискатель осуществил на новом уровне решение крупной научной задачи — изучение характеристик гидрометеорологического и гидродинамического режимов Каспийского моря на основе космических технологий – спутниковой альтиметрии.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, работа С.А. Лебедева отвечает критериям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор достоин присвоения

ему степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29  
«Физика атмосферы и гидросфера».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, старший  
научный сотрудник Лаборатории  
взаимодействия и вод суши и  
атмосферы  
ФГБУН Института водных проблем  
Российской академии наук



Фролов Анатолий Васильевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт водных проблем Российской академии наук,  
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,  
тел. +7(499) 135-54-56  
e-mail: [anatolyfrolov@yandex.ru](mailto:anatolyfrolov@yandex.ru)

22 сентября 2014 г.

Подпись А.В. Фролова заверяю

Ученый секретарь  
ФГБУН Института водных проблем  
Российской академии наук



Степанова Марианна Исааковна