

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ)

На правах рукописи

Вербицкая Ольга Александровна

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА
СИНОПТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ И ТЕЧЕНИЙ
КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

Специальность: 25.00.28 - «океанология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2004

Вербицкая

Работа выполнена в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре РФ (Гидрометцентр России)

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук О.И. Зильберштейн

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук В.Н. Зырянов

Кандидат физико-математических наук Н.А. Дианский

Ведущая организация:

Каспийский морской научно-исследовательский центр

Защита состоится 16 декабря 2004 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета К327.007.01 по присуждению ученой степени кандидата наук при Государственном океанографическом институте по адресу: 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного океанографического института.

Автореферат разослан 11 ноября 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.н.



Н.В. Жохова

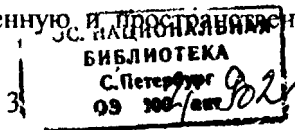
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших проблем современной океанологии является изучение изменчивости океана и ее прогноз. Для успешной работы организаций, связанных с морем, необходим прогноз основных характеристик режима моря: температуры воды, солености, ледовых явлений, уровня моря, течений, волнения.

Акватория Северного Каспия в значительной мере подвержена воздействию сгонно-нагонных колебаний уровня моря, сопровождаемых интенсивными течениями. В случаях экстремальных штормовых нагонов, приносящих значительные разрушения на побережье (например, штормовые события 1952 и 1995 гг., приведшие к катастрофическим последствиям), нагонные волны проникают далеко за береговую черту (иногда на десятки километров, затапливая огромные пространства суши). Обширные мелководья, низкие пологие берега при сильных ветрах способствуют развитию штормовых событий, особенно в осенний и весенний сезоны. Поскольку побережье Каспийского моря густо населено, катастрофические нагоны могут приводить к весьма тяжелым последствиям и человеческим жертвам. Прогноз сгонов (их величина обычно превышает величину нагонов) также важен, поскольку, помимо угрозы безопасному мореплаванию, угрожает нормальной работе водоемов-охладителей атомных станций расположенных на побережье.

Ухудшение экономического положения на пространстве СНГ в 90-е годы, естественно, отразилось на состоянии наблюдательной сети прикаспийских стран. Значительная часть гидрометеорологических станций была закрыта. Качество наблюдений ухудшилось. Все это не могло не сказаться на качестве и количестве поступающей оперативной гидрометеорологической информации. Это, в свою очередь, отразилось на качестве прогнозов, так как до сих пор для составления региональных морских прогнозов до сих пор используются регрессионные методы, для которых чрезвычайно важно своевременное поступление срочных данных об уровне моря и метеорологической обстановке в регионе.

Основной целью диссертации являлась разработка гидродинамического метода краткосрочного прогноза колебаний уровня и течений в Каспийском море на основе оперативного метеорологического прогноза. Адекватный учет многообразия природных факторов, имеющих существенную временную и пространственную изменчи-



вость, позволяющий прогнозировать штормовые колебания уровня моря и течений на весьма обширной акватории определяет научную новизну работы.

В соответствии с этим в работе решались следующие **задачи**:

1. Изучение особенностей короткопериодных (от нескольких часов до нескольких суток) колебаний уровня моря и течений, их формирования и трансформации на мелководье.
2. Адаптация трехмерной бароклинной гидродинамической модели с учетом осушения и затопления прибрежных территорий к акватории Каспийского моря.
3. Выполнение специальных численных экспериментов по моделированию и сравнению с наблюдениями экстремальных исторических штормовых ситуаций на Каспии.
4. Разработка методов и оптимального программного обеспечения обработки входной прогностической метеорологической и гидрологической информации для расчета и интерполяции приводных (приземных) значений атмосферного давления, касательного напряжения ветра, расхода рек, испарения по акватории, положения кромки льда, топографии прибрежной зоны и др.
5. Представление результатов прогнозов (временные ряды значений уровня моря и течений в конкретных пунктах и цифровые поля указанных характеристик, в том числе в графическом виде).
6. Разработка методов оценки качества морских гидродинамических прогнозов, включающих необходимые статистические оценки с учетом требований действующих нормативных документов и опыта индустриально развитых стран.
7. Проведение испытаний прогностического комплекса «Метеорологическая модель - Морская гидродинамическая модель» в течение нескольких лет в рамках Автоматизированной системы обработки оперативной информации Гидрометцентра России.

Теоретическая и практическая ценность работы.

Впервые в России выполнено интегрирование 2 прогностических моделей - оперативной региональной модели атмосферы Гидрометцентра России (автор В.М. Лосев) и оперативной морской модели штормовых колебаний уровня и течений Каспийского моря, включая оперативные данные по ледовой обстановке и суточному расходу реки Волги.

Разработан метод оценки качества прогнозов уровня моря в соответствии с действующими нормативными документами Росгидромета и проведена детальная оценка качества прогнозов уровня моря. Так как технология работает в оперативном режиме, статистические оценки качества продолжают регулярно рассчитываться и уточняться. Эти работы проведены автором.

Работа выполнена в рамках тем ГНЦ - Гидрометцентр России Проект 2.7 «Трехмерная гидродинамическая модель уровня и течений Каспийского моря» и ФЦП «Экология и природные ресурсы России» тема 1.5.1.2 ЦНТП-5 «Разработка новых и развитие существующих методов и технологий оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров морской среды в интересах обеспечения морских отраслей экономики и обороны страны».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Для акватории Каспийского моря реализована гидродинамическая бароклинная модель, учитывающая многообразие природных факторов, определяющих динамику течений и колебаний уровня синоптического масштаба.
2. Разработан и внедрен в Автоматизированную систему обработки оперативной информации Гидрометцентра России метод гидродинамического краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Каспийском море.
3. Метод оценки качества прогнозов уровня моря удовлетворяет Требованиям Действующих нормативных документов Росгидромета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения и приложения. Работа изложена на 175 страницах, содержит 14 таблиц и 58 иллюстраций, 28 из которых приведены в Приложении. Список использованной литературы содержит 190 наименований, из них 72 на иностранных языках.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и Ученых советах Гидрометцентра России и ГОИН, а также на международной научно-практической конференции «Проблемы гидрометеорологии и экологии» (Алматы, Казахстан, сентябрь 2001 г.); «Информационные ресурсы об океане - актуальные проблемы формиро-

вания, распространения и использования в научных исследованиях и в морской деятельности», г. Обнинск, 8-10 октября, 2002; "Освоение шельфа арктических морей России (РАО-03)" (Санкт-Петербург, 2003); VIII международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 2003); «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (Санкт-Петербург, 2004 г.).

По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Благодарности. При выполнении работы автор пользовался помощью и советами сотрудников Лаборатории морских прикладных исследований, а также коллег из других подразделений Гидрометцентра России. В действующей оперативной технологии прогноза были использованы их программные разработки, методические и технические достижения. Автор выражает всем искреннюю благодарность.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, излагаются её цели и задачи работы, научная новизна, теоретическое и практическое значение.

Глава 1. Методы расчета к прогноза колебаний уровня моря и течений

В главе, носящей обзорный характер, анализируются существующие российские и зарубежные методы расчета и прогноза краткосрочных колебаний уровня моря и течений. Показано, что до нынешнего времени в оперативной практике использовались в основном физико-статистические методы прогноза уровня моря, основные ограничения которых - возможность составления прогноза для одного пункта только при наличии в этом конкретном пункте длительных рядов качественных наблюдений над уровнем моря. Часто при переходе на независимый материал точность этих прогнозов снижается. Прогностические зависимости, построенные на основе методов спектральной регрессии, позволяют минимизировать этот недостаток, однако также требуют длительных рядов наблюдений и очень трудны в реализации.

Прогноз морских и океанских течений является одной из самых трудных задач практической океанографии, так как из-за отсутствия

достаточного количества наблюдений не разработаны или не проверены методы прогноза течений, которые могли бы использоваться в оперативной практике.

В ситуации, когда нет длительных регулярных морских наблюдений, единственным эффективным средством получения информации является численное моделирование и разработанные на его основе гидродинамические методы (расчета) прогноза колебаний уровня моря и течений. В связи с этим более подробно рассмотрены гидродинамические модели колебаний уровня моря и течений, используемые в научных целях и практических расчетах. Приведен обзор существующих оперативных технологий прогноза параметров морской среды, основанных на двух- и трехмерных гидродинамических моделях. Развитые до оперативных технологий, они успешно используются для обеспечения безопасности мореплавания и предупреждения населения об опасных подъемах и спадах уровня моря, а также минимизации негативных последствий стихийных природных и техногенных катастроф.

Глава 2. Физико-географическая характеристика и изученность гидрометеорологического режима Каспийского моря

Приведены общие сведения о физико-географических условиях, присущих Каспийскому морю. На основе собственных исследований и литературных данных рассматриваются основные факторы, обуславливающие колебания уровня моря и течений различного временного масштаба: многолетние, межгодовые, сезонные и кратковременные.

В многолетних колебаниях уровня Каспийского моря видимая закономерность отсутствует. На эти процессы оказывают влияние климатические изменения (от 2-5-летних до квазивековых), тектонические процессы и хозяйственная деятельность человека.

Сезонные колебания уровня вызываются изменениями водного баланса в течение года и имеют четко выраженный циклический характер. Самое низкое в году положение уровня моря наблюдается в зимний период (декабрь-февраль), а затем начинается его повышение до июля с наибольшей интенсивностью роста в мае. Основная часть воды приходит с речным стоком 60-90%, в котором доля Волги составляет 76%. В Северном Каспии, куда поступает основная часть речного стока, многолетние изменения сезонного хода выражены наиболее ярко, а размах колебаний больше, чем в остальной части.

Наиболее значительные сезонные колебания уровня моря отмечаются в мелководной части устьевого взморья Волги, в особенности у морского края дельты, где в среднем они достигают 1 м и постепенно уменьшаются в сторону моря до значений, характерных для сезонного хода всего Каспийского моря (30-40 см). Паводочная волна распространяется с севера на юг по акватории с запаздыванием от одного до двух месяцев, поэтому время наступления максимальных уровней в пунктах на южном побережье происходит с таким же опозданием.

Кратковременные изменения уровня Каспийского моря происходят при постоянном объеме воды. К внешним силам, изменяющим положение уровня моря, относятся касательные напряжения ветра, изменения барического давления над поверхностью моря. Максимальные величины (размахи) непериодических колебаний уровня моря достигают в северной части Каспийского моря 2,5-3 м (*Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992*). Например, во время нагона в ноябре 1952 г. величина нагона в п. о. Тюлений составила 238 см (относительно среднемесячного уровня моря), а в п. о. Искусственный - 309 см. Характерный период развития нагонов обычно составляет от нескольких часов до нескольких суток.

Уровенная поверхность Каспийского моря даже при многолетнем осреднении не представляет собой горизонтальную плоскость, а имеет более сложную форму в которой отчетливо прослеживается уклон водной поверхности вдоль меридиональной оси с севера на юг. От широты Форта Шевченко до южного берега Каспия (Иран) в среднемноголетнем осреднении он составляет 1,8 см на 100 км. Тогда как уклоны водной поверхности от морского края дельты Волги до о. Тюлений составляют примерно 1 см на 1 км (*Устьевая область Волги, 1998*).

К причинам, вызывающим течения на Каспийском море, относятся ветер, сгонно-нагонные явления, распределение плотности воды, речной сток, ледовые условия. Основным фактором, формирующим поле течений в Каспийском море, является ветер, преобладающим видом течений - ветровые. Течения, обусловленные остальными факторами, пока изучены недостаточно. Многолетняя и сезонная изменчивость течений связана с изменением режима ветра, стока, зарастанием мелководий и наличием ледяного покрова.

Очевидно, что среди морских прогнозов на Каспии наиболее важными являются оперативные прогнозы уровня моря, для выпуска

которых до нынешнего времени использовались регрессионные методы.

Глава 3. Трехмерная гидродинамическая бароклинная модель

Для расчетов уровня моря и течений в Каспийском море используется трехмерная гидродинамическая бароклинная модель со свободной поверхностью (Попов, 2004). Исходная система уравнений в декартовой системе координат в приближении гидростатики и f – плоскости записывается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(vu) + \frac{\partial}{\partial z}(wu) - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + N_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) + \frac{\partial}{\partial z}(wv) + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + N_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uS) + \frac{\partial}{\partial y}(vS) + \frac{\partial}{\partial z}(wS) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\rho = f(T, S, p). \quad (7)$$

Начало координат расположено на невозмущенной поверхности моря, ось z направлена вверх, ось y направлена на север, ось x - на восток. Используются следующие обозначения: f – параметр Кориолиса; p – давление; ρ – плотность; T – температура, S – соленость,

u, v, w – составляющие поля скорости по осям x, y, z соответственно;
 g – гравитационное ускорение.

Давление представлено с использованием уравнения гидростатики:

$$p = \int_z^\zeta \rho g dz = p_a + p_s + \rho_\zeta g \zeta, \quad (8)$$

где ζ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного положения определяет внешнюю баротропную составляющую давления; ρ_ζ – плотность в поверхностном слое. N_z, N_h – коэффициенты вертикальной и горизонтальной вязкости; K_z – коэффициент вертикальной диффузии. $p_s = \int_z^0 \rho g dz$ – внутренняя бароклинная компонента давления; p_a – атмосферное давление. Горизонтальная турбулентная диффузия не учитывается.

Коэффициент вертикальной турбулентной вязкости N_z задается переменным по глубине (Kochergin, 1987):

$$N_z = (c_{ML} \cdot h_{ML})^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} + \frac{1}{S_M} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}. \quad (9)$$

где $c_{ML} = 0,05$ – коэффициент пропорциональности; h_{ML} – толщина перемешанного слоя, которая должна быть задана априори, например, на основе данных наблюдений над температурой и соленостью; S_M – число Шмидта, которое определяется через число Ричардсона

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left/ \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \right] \right., \quad (10)$$

$$S_M = Ri / [0,725(Ri + 0,186 - \sqrt{Ri^2 - 0,316 Ri + 0,0346})]. \quad (11)$$

Таким образом, интенсивность турбулентного перемешивания зависит как от скорости течения, ее вертикальных сдвигов, так и от стратификации.

На твердых боковых границах задается условие прилипания, т.е. равенства нулю нормальной и тангенциальной компонент скорости.

На поверхности моря задаются касательные напряжения ветра, кинематическое условие и отсутствие потока плавучести:

$$N_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{xz}, N_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{yz}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

На дне принимается квадратичный закон трения, задаются кинематическое условие обтекания течением неровностей рельефа дна $H(x,y)$ и отсутствие потока плавучести:

$$N_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{bx}, N_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{by}, u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = w, K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

где $(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (C_d U_{\alpha} |\vec{U}_a|, C_d U_{\alpha} |\vec{U}_a|)$, \vec{U}_a – вектор скорости ветра, $C_d = 3,2 \cdot 10^{-6}$; $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = (\alpha u_b |\vec{U}_b|, \alpha v_b |\vec{U}_b|)$, \vec{U}_b – вектор придонного течения, $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Описан алгоритм учета осушения и затопления прибрежных территорий. Учет этого явления очень важен, так как во время штормовых ситуаций нагонная волна может проникать далеко вглубь суши. Численные эксперименты показали, что использование этого алгоритма в расчетах важно не только для определения зон затопления или осушения при нагонах или сгонах, но и для получения достоверных оценок величин нагонов или сгонов, а также скоростей течений в прибрежной зоне. Тот факт, что задается не только батиметрия, но и топография прилегающей территории, позволяет проводить расчеты при различных отметках стояния уровня Каспийского моря.

Выполнены расчеты для нескольких экстремальных штормов. В качестве метеорологической информации использовался ветер, измеренный в пунктах о. Искусственный, Каспийский, о. Тюлений, о. Кулалы, о. Пешной. Эти же штормовые ситуации были рассчитаны на основе данных метеорологического реанализа NCEP/NCAR (*Kalnay et al., 1996*). Задавался средний уровень Каспийского моря и расход Волги соответствующие месяцу, в котором наблюдалось рассматриваемое штормовое событие. Сравнивался расчетный и наблюдаемый уровень моря в пунктах о. Искусственный, Каспийский, о. Тюлений, о. Кулалы, о. Пешной. Также оценивалась зона затопления.

Численные эксперименты показали, что модель адекватно отображает экстремальные штормовые события.

Глава 4. Технология краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в Каспийском море

В течение 1998-2001 гг. в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре России (Гидрометцентре России) был разработан метод гидродинамического прогноза уровня моря и течений:

1. В основе численной реализации метода лежит трехмерная гидродинамическая бароклинная модель. Используются климатические сезонные поля плотности морской воды.

2. В модели применяется новый алгоритм осушения и затопления прибрежных областей. Учет этого явления очень важен, так как на низких равнинных побережьях нагонная волна может распространяться далеко вглубь территории. Данная процедура также позволяет правильно рассчитывать колебания уровня моря и скоростей течений. Пренебрежение этим эффектом может приводить к завышенным оценкам величин экстремальных нагонов.

3. Задается батиметрия, соответствующая современному положению среднего уровня Каспийского моря. Предусмотрена возможность проведения расчетов при различных положениях среднего уровня Каспийского моря.

4. Моделирование осуществляется для всей акватории Каспийского моря, что позволяет получать прогноз в виде полей уровня моря и скоростей течений на стандартных горизонтах для всей акватории моря, а также в виде временных рядов уровня моря в любом пункте (в том числе для районов, где наблюдения отсутствуют).

5. В качестве входной метеорологической информации используются прогностические поля приземного атмосферного давления с заблаговременностью до 48 ч и дискретностью 6 ч, полученные по региональной модели атмосферы, действующей в Гидрометцентре России. На основе этой информации по специально разработанной методике рассчитываются поля ветра. Прогноз составляется 2 раза в сутки, сразу после завершения расчетов по метеорологической модели. Заблаговременность морского прогноза определяется заблаговременностью метеорологического прогноза и составляет 48 ч.

6. Учитывается ежедневный расход Волги (так как в основном Волга определяет фоновое пространственное распределение уровня в Северном Каспии).

7. При расчетах касательного напряжения ветра учитывается кромка льда 50% сплоченности, которая задается по еженедельному

прогнозу ледовой обстановки, выпускаемому отделом морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России.

8. Принято следующее допущение для задания водного баланса "расход Волги равен испарению с акватории всего Каспийского моря".

9. В качестве начальных условий по уровню моря и скоростям течений на всех расчетных горизонтах используются прогностические значения с соответствующей заблаговременностью (12 ч), полученные с предыдущего расчета.

На рис.1 приведены наблюдаемые (точки) и прогностические (60 прогнозов на 48 ч, показанных кривыми) значения уровня моря в 4 пунктах Каспийского моря в ноябре 2003 г. Значения уровня моря даны в сантиметрах относительно среднего уровня за 30 суток предшествующих дате прогноза (расчета). Так как прогнозы составляются дважды в сутки (т.е. каждые 12 ч), то каждой точке на оси абсцисс соответствует до 7 прогностических значений уровня моря различной заблаговременности. Таким образом, рисунок позволяет оценить степень согласия расчетных и наблюдаемых значений уровня моря.

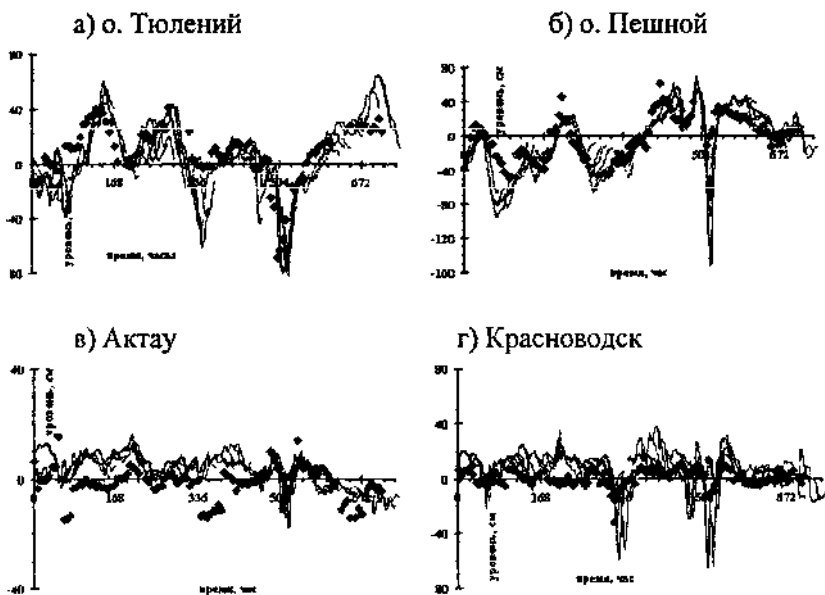


Рис. 1. Временной ход расчетного (линии) и фактического уровня (точки) в различных пунктах Каспийского моря в ноябре 2003 г.

Разработанный метод проходил испытания, которые показали, что статистические характеристики качества прогнозов уровня моря удовлетворяют требованиям действующих в РФ нормативных документов.

Глава 5. Анализ результатов и оценка качества прогнозов колебаний уровня моря и течений в Каспийском море

Глава посвящена разработке методов оценки качества расчетов и прогнозов краткосрочных колебаний уровня моря и течений. Описана методика оценки качества краткосрочных прогнозов уровня моря и течений, установленная в РФ на основании действующих нормативных документов - «Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрометеорологических прогнозов, 1982» и «Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284-91, 1991».

Оценка точности метода прогноза колебаний уровня моря проводилась на основе сравнения прогностических значений с имеющимися данными срочных наблюдений над уровнем моря в пунктах, расположенных на побережье и островах Каспия и передающих информацию в оперативном коде КН-02. Для прогнозов уровня моря должны рассчитываться средняя абсолютная, средняя относительная, средняя арифметическая и стандартная ошибки, корреляция тенденций, оправдываемость прогнозов уровня моря, а также относительная ошибка определения пика нагона и времени его наступления. Прогноз считается оправдавшимся, если разница между предсказанным и наблюдаемым значениями уровня моря по модулю не превышает $0,674\sigma_n$, где σ_n - изменчивость элемента за период наблюдений или период для которого проводится сравнение и рассчитывается только по наблюдениям. Формально оправдываемость методических прогнозов должна быть не менее 68%. Продолжительность испытаний методов краткосрочных морских гидрологических прогнозов должна составлять не менее одного года. Дня сокращения срока испытаний и получения статистически обоснованных выводов о надежности методов прогноза гидрометеорологических явлений с малой природной повторяемостью (опасных и стихийных) необходимо использовать независимый ряд наблюдений по архивам прошлых лет.

Поскольку гидродинамические прогнозы уровня до сих пор практически не использовались в России в оперативном режиме, предлагается собственный подход, опирающийся на статистические оценки с учетом существующих российских нормативных требований к морским прогнозам и сложившейся практикой использования оперативных технологий в индустриально развитых странах.

Статистические характеристики качества оперативных прогнозов уровня моря рассчитывались для пунктов Каспийского моря, передающих информацию в оперативном коде КН-02 не менее, чем за 4 срока в сутки.

В табл. 1 приведены среднеквадратическая ошибка прогнозов уровня в нескольких пунктах Каспийского моря.

Таблица 1

Средняя квадратическая ошибка прогнозов уровня в пунктах Каспийского моря за период с июня 2001 г. по декабрь 2003 г.

Пункт	Заблаговременность, ч								
	0	6	12	18	24	30	36	42	48
о. Тюлений	20,1	19,6	19,9	19,6	17,8	19,3	19,2	20,7	22,2
Махачкала	13,6	13,7	13,8	13,6	13,8	14,4	14,8	15,0	15,5
Актау	8,1	7,9	8,1	0,8	7,9	8,1	8,0	8,4	8,1
ф. Шевченко	8,9	12,5	9,0	12,9	10,0	13,4	10,1	13,7	10,9
о. Кулалы	12,7	11,8	16,1	11,9	17,3	12,4	17,5	14,0	18,8
о. Пешной	25,1	25,3	24,7	26,4	26,3	28,0	28,2	29,6	30,3
Красноводск	13,9	14,2	14,1	15,7	12,8	15,5	15,1	14,7	14,6
Куули-Маяк	7,3	7,7	7,3	8,5	8,1	8,0	7,3	8,3	7,3
Кара-Богаз-Гол	9,1	8,9	13,0	9,4	12,3	9,4	11,8	10,0	13,3
о. Огурчинский	10,5	11,0	12,0	11,3	11,8	11,3	11,7	11,4	11,2

В табл. 2 приведена оправдываемость прогнозов уровня моря и штормовых событий для различных заблаговременностей по месяцам и за период с июня 2001 г. по декабрь 2003 г в п. о. Тюлений. Средняя оправдываемость методических прогнозов штормовых нагонов с заблаговременностью 12 ч составляет 76%, что отвечает требованиям (*Наставление...*, 1982). Низкая оправдываемость прогнозов в летние месяцы связана с определением допустимой ошибки. Как уже отмечалось, допустимая ошибка прогноза равна 0,674 средней изменчивости прогнозируемого элемента за рассматриваемый период. Так, например, средняя изменчивость уровня моря в п. о. Тюлений в летние месяцы составляет 6 см, а в зимние - 22-25 см. Таким образом, допустимая ошибка прогноза уровня в п. о. Тюлений в летние месяцы бывает порядка 4 см, а в зимние 15-17 см.

Таблица 2

Оправдываемость (%) прогнозов уровня моря и штормовых событий (отклонение уровня от среднего уровня моря больше 40 см) за период с июня 2001 г. по декабрь 2003 г. о. Тюлений

Заблаговременность, ч.	Месяц												Среднее	Штормовые события
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0	45	46	48	71	63	55	59	61	53	83	58	89	61	75
6	42	50	43	76	60	49	65	61	60	81	48	82	60	65
12	46	46	47	72	64	55	59	60	57	82	60	88	61	76
18	35	48	44	74	56	53	59	56	58	81	53	88	59	70
24	49	54	42	66	57	59	66	64	67	87	63	93	64	77
30	45	54	37	63	48	53	62	59	65	84	56	86	59	63
36	48	54	36	59	60	58	67	63	68	85	66	88	63	64
42	39	46	35	56	53	52	63	45	70	81	56	83	57	61
48	40	47	41	60	51	48	54	85	70	82	60	80	60	63

Методики оценки качества прогнозов скоростей течений практически отсутствуют как у нас, так и в других странах. К сожалению,

В настоящее время у нас нет данных наблюдений *та.* скоростями течений, необходимых для оценки качества расчетов. Как уже говорилось выше, для оценки качества краткосрочного (до 3-х суток) прогноза параметров морской среды необходимо наличие непрерывного ряда срочных наблюдений за период не менее 1 года.

Основные результаты и выводы

При завершении работы получены следующие основные результаты:

1. Для акватории Каспийского моря реализована гидродинамическая бароклинная модель, учитывающая многообразие природных факторов, определяющих динамику течений и колебаний уровня синоптического масштаба. Данная модель была тщательно верифицирована на основе данных наблюдений над уровнем моря.

2. Существенным достоинством модели является возможность учета фоновых (долгопериодных) изменений среднего уровня Каспийского моря, на основе чего выполняется корректировка батиметрии бассейна и контура береговой черты.

3. Разработан метод гидродинамического краткосрочного прогноза уровня моря и течений, основой которого является трехмерная бароклинная гидродинамическая модель. Используются сезонные климатические поля плотности морской воды. Показатели качества прогнозов уровня моря, составленных с использованием данного метода, удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов по службе морских прогнозов. Решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 17 октября 2001 г. и от 14 октября 2003 г. было рекомендовано внедрить его в качестве основного метода краткосрочного прогноза уровня в Каспийском море. С июня 2001 г. технология включена в Автоматизированную систему обработки оперативной информации.

4. Важной особенностью разработанного и изложенного в работе метода является возможность получения пространственных оценок затапливаемых и осушаемых территорий. Приведены результаты сравнения расчетных зон затопления с данными авиаразведок, проведенных сразу после экстремальных штормовых событий, которые показали возможность и сравнительную успешность подобных прогнозов.

5. В качестве исходной метеорологической информации могут быть использованы цифровые поля приземного атмосферного давления, полученные по прогностической региональной модели атмосферы Гидрометцентра России.

6. Показано, что изменением плотности морской воды при краткосрочном прогнозировании можно пренебречь, поскольку этот эффект оказывает незначительное влияние на величину колебаний уровня моря и скоростей течений. Таким образом, в прогностических расчетах допускается использовать поле плотности морской воды, полученное методом гидродинамического диагноза и адаптации по исходному полю, построенному на основе обработки данных многолетних наблюдений.

7. В качестве начальных условий по уровню моря и скоростям течений на всех расчетных горизонтах используются прогностические значения, полученные с предыдущего расчета.

8. Верификация метода выполнена на основе сравнения результатов прогностических расчетов с данными наблюдений на станциях Каспийского моря, передающих информацию в коде КН-02. Оценка надежности и точности проводилась в соответствии с действующими нормативными документами Росгидромета и с учетом **практики** работающих оперативных технологий морских прогнозов штормовых ситуаций в индустриально развитых странах, опыт которых детально изучен и проанализирован автором в диссертации.

9. Разработано соответствующее программное обеспечение, объединившее в единую оперативную технологию основные составляющие метода: обработка и подготовка входной метеорологической, гидрологической и ледовой информации («препроцессинг»); трехмерная бароклинная модель, обеспечивающая расчет цифровых полей уровня моря и течений на различных горизонтах; обработка и представление результатов прогноза; расчет статистических показателей качества прогнозов уровня моря.

Список опубликованных работ

1. Калацкий В.И., Зильберштейн О.И., Сафронов Г.Ф., Баранова О.А. Расчет параметров гидрологической дисперсии радиоактивных загрязняющих веществ (на примере прибрежной зоны Южного Каспия) // Труды ГОИН, Юбилейный сборник, 1995, вып. 2.
2. Zilberstein O.I., Tikhonova O.V., Baranova O.A., Safronov G.F. Hydrodynamic simulation of storm surge in the Azov Sea and pollution

transport between Azov and Black Seas // Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Ankara, vol.3, 1995, p. 1633-1643.

3. Zilberstein O.I., Safronov G.F., Verbitskaya O.A., Popov S.K., Chumakov M.M. Integrated Methods for Obtaining of the Specialised Hydrometeorological Information. // "Integrated Approach to Environmental Data Management Systems", Kluwer Publisher, 1997, - 15 p.

4. Popov S.K., Safronov G.F., Zilberstein O.I., Tikhonova O.V., Verbitskaya O.A. Density and residual tidal circulation and related mean sea level of the Barents Sea. // In Ocean Circulation Science derived from the Atlantic, Indian and Arctic Sea Level Networks. IOC Workshop Report No. 171 p. 106-131. UNESCO 2000.

5. Зильберштейн О.И., Сафронов Г.Ф., Попов С.К., Лобов А.Л., Вербицкая О.А., Чумаков М.М., Елисов В.В. Современные проблемы обеспечения изысканий на шельфе экстремальными и оперативными характеристиками уровня моря и течений // Тр. Пятой Международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России» (РАО-01). С.-Петербург, 2001. - С. 281-286.

6. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний // Гидрометцентр, Информационный сборник № 29. - 2002. - С. 76-89.

7. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. Технология краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря // Тезисы докладов конференции «Информационные ресурсы об океане - актуальные проблемы формирования, распространения и использования в научных исследованиях и в морской деятельности», г. Обнинск, 8-10 октября, 2002.-2002.-С. 171-173.

8. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. Возможность специализированного гидрометеорологического обеспечения транспортировки, установки и эксплуатации морских сооружений на основе гидродинамического прогноза уровня моря и течений // Труды РАО-03, Санкт-Петербург, 16-19 сентября, 2003. - 2003. - С. 360-364.

9. Verbitskaya O.A., Zilberstein O.I., Popov S.K., Lobov A.L. Operational model of short-term sea level forecast in the Caspian Sea. // Pro-

ceedings of the MEDCOAST International Conference, Ravenna, Italy. - 2003." P. 2179-2187.

10. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. О результатах оперативных испытаний технологии краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Каспийском море // Гидрометцентр России, Информационный сборник. - 2004 (в печати).

11. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К. Оперативная технология краткосрочного гидродинамического прогноза уровня моря и течений в Каспийском море // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». - М.: 2003. - С. 206-207.

12. Verbitskaya O.A., Popov S.K., Zilberstein O.I. Model for Short-term Sea Level and Current Forecast in the Black and Azov Seas // Proceedings of the Black Sea Coastal Air-Sea Interaction / Phenomena and Related Impacts and Applications. International Workshop. Constanta, Romania, 13-15 May, 2004. - 2004. - P. 41-44.

Издательская лицензия ЛР № 065802 от 09.04.98.

Подписано в печать 04.11.2004.

Усл. печ. л. 1,25

Тираж 100 экз. Заказ 139.

Отпечатано в типографии ООО «Мультипринт»
121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 10, корп. 6.

Тел.: 230-44-17

#22535