

УДК 551.321/322

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ  
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ НА  
КАСПИЙСКОМ МОРЕ**

Х.Р. Йенсен  
Канд. геогр. наук Н.И. Ивкина  
Т.П. Строева

*В статье представлены некоторые результаты тестирования системы предупреждения штормовых нагонов на Каспийском море, основанной на численном моделировании трансформации в прибрежной зоне и динамики наката на берег морских нагонных волн Каспийского моря.*

Изучение трансформации в прибрежной зоне и динамики наката на берег морских нагонных волн представляет как теоретический, так и прикладной интерес. Внимание к практической стороне этих задач обусловлено тем, что выход волн на берег часто вызывает катастрофические последствия. Поэтому при проектировании и защите гидротехнических и гражданских сооружений на одно из центральных мест выдвигаются прогнозы уровня моря, полученные с помощью численного моделирования, которое с развитием вычислительной технологии и численных методов становится все более совершенным.

Для качественного тестирования вычислительных экспериментов наиболее обоснованно моделирование штормовых нагонов, для которых обычно известно внешнее возмущающее воздействие со стороны атмосферы и которое может быть сопоставлено с результатами натуральных наблюдений. В настоящее время наиболее подходящей физико-математической моделью изучения процесса наката и отражения волн являются гидродинамические уравнения мелкой воды. Система именно таких уравнений решается гидродинамическим модулем модели MIKE 21, разработанной в Датском гидравлическом институте и адаптированной к мелководным условиям Северного Каспия [4, 6-8]. Эта модель является структурным элементом технологической линии оперативной системы прогнозирования штормовых нагонов с заблаговременностью до 120 ча-

сов. Система позволяет получать по каналам связи метеорологическую информацию из Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (Великобритания), гидрологическую – с казахстанских станций на Каспийском море, обрабатывать ее и в кратчайшие сроки составлять все необходимые прогнозы. Использование метеорологических прогнозов позволяет обеспечить упреждающее моделирование возможных последствий от штормовых нагонов.

Ниже представлены результаты тестирования в течение 2001 г созданной системы, позволяющей не только предсказывать штормовой нагон, но и описывать динамику волны в прилегающей к берегу области, а также рассчитывать величину заплеска и зону затопления. Необходимо отметить, что система в этот период работала в полуоперативном режиме, так как потребителям не выдавались штормовые предупреждения. Для ее создания и установки решались следующие задачи:

- усовершенствование существующей нагонной модели;
- получение доступа к метеорологической информации;
- проведение калибровки и верификации модели;
- разработка автоматических процедур для составления полуоперативных прогнозов;
- осуществление прогона модели в течение одного испытательного года, в соответствии с требованиями Наставления о продолжительности испытаний модели для краткосрочных морских прогнозов;
- оценка качества прогнозов.

Модель MIKE 21 состоит из атмосферного и гидродинамического блоков, связанных между собой параметрами взаимодействия. Моделирование взаимодействия атмосферы и океана требует разрешения целого ряда неизученных вопросов, связанных с перераспределением энергии ветра, которое существенно зависит как от времени действия штормового волнения, так и обширности мелководного шельфа. Поэтому одним из важнейших условий для составления достаточно точных прогнозов ежечасных уровней моря во время сгонно-нагонных ситуаций является наличие батиметрической основы высокого качества. Особенно это необходимо для мелководных прибрежных зон, поскольку, чем ниже разрешение батиметрии, тем сложнее схематизировать в модели узкие каналы и устья рек.

В качестве такой основы для описания эволюции сгонов и нагонов на всей акватории Каспийского моря принята батиметрическая модель с шагом сетки 10 км, а для мелководной северной части моря - с разрешением



2 км. Батиметрические модели построены по имеющимся топографическим и морским картам, данным промеров глубин на отдельных участках моря и аэрофотоснимкам [1]. Учитывая важное значение определения площадей возможного затопления прибрежных территорий, в батиметрических моделях охвачены районы с отметками поверхности суши до минус 22 м.

Улучшить качество расчета уровня воды с применением модели нагонов, можно посредством учета ежегодных колебаний уровня воды. Поэтому в модель была введена средняя величина речного притока. Безусловно, что для получения более точной оценки притока, необходимы данные фактического притока и прогноза притока на ежедневной основе. Однако, на практике получить такие данные для Каспийского моря не представляется возможным. Поэтому были проведены следующие исследования:

- установлены ряды многолетнего речного притока основных рек в Каспийское море, при выполнении условия, чтобы временное разрешение хронологических рядов было не менее одного месяца;
- рассчитаны величины “видимого” испарения (осадки за вычетом испарения) с поверхности Каспийского моря.

Многолетний сток был принят как средняя величина за последние 5-10 лет. Поскольку модель штормового нагона не предназначена для моделирования элементов водного баланса, временные ряды испарения рассчитаны по модели водного баланса, разработанной Робинот Вардлоу. В качестве фонового уровня Каспийского моря использовался современный уровень равный минус 27 м, который в дальнейшем может быть модифицирован.

Северная часть Каспийского моря в зимний период часто покрыта льдом. Для исключения ошибок в прогнозе уровня моря в этот период необходим учет наличия ледяного покрова, ограничивающего влияние ветра на водную поверхность. Для этой цели были построены характерные карты ледового покрытия и введен коэффициент, понижающий ветровое напряжение. В оперативном режиме в течение зимнего сезона вводимая в модель карта при необходимости может корректироваться с учетом фактической информации о ледовой обстановке.

Значения приземного атмосферного давления, направления и скорости ветра над морем, используемые в вычислениях, определялись в узлах расчетных сеток как по приземным картам погоды, так из ежедневных численных прогнозов барического поля от 24 до 120 часов, которые затем преобразовывались в формат модели штормовых нагонов. Помимо этого, можно в качестве входной информации использовать также срочные дан-



ные по ветру, измеренные на казахстанских гидрометеорологических станциях.

Для Каспийского моря модель штормового нагона адаптирована по данным измерений для ряда известных штормов: 02.04 – 12.04.1965 г, 27.05 – 10.06.1967 г, 01.05 – 08.05. 1990 г, 04.09 – 15.09 1996 г. Значения уровня моря в эти годы были измерены по четырем срокам на М Пешной, а в 1996 г еще и с помощью датских автоматических самописцев уровня, установленных на акватории моря. Каждый выбранный шторм покрывает приблизительно недельный период, так как модели необходимо 2-3 дня для раскрутки, прежде чем фактический шторм был правильно смоделирован. Сравнение полученных результатов с материалами натурных наблюдений свидетельствует о достаточно высоком качестве работы модели, следовательно, о возможности ее применения для решения различных прикладных задач [2].

С 2001 г метод прогнозирования ежечасных колебаний уровня моря в период штормовых нагонов проходит производственные испытания. Каждый день испытаний покрывает период от –24 часов до +120 часов. Период от минус 24 часов до 00 часов так называемый период ретроспективных прогнозов, так как данные этого периода основываются на метеорологическом анализе. Период с 00 часов до плюс 120 часов – период прогнозирования. Все расчеты (кроме самого первого) начинаются с так называемого оперативного файла. Этот файл образуется во время предыдущего дня расчета (в 00 часов).

Таким образом, при ежедневном обновлении модель ретроспективных прогнозов дает наилучшие входные условия для новых прогнозов. Соответственно, по мере поступления уточненных данных с постов наблюдения, моделируемые значения должны либо адаптироваться к уточненным исходным данным, либо осуществляться возобновление моделирования с использованием новых условий. Результаты расчетов могут быть представлены как в форме графиков, так и таблиц. На рис.1 показано сравнение 4 удачных прогнозов уровня воды, извлеченных из 2 км модели с измеренными у М Пешной в августе 2001 г.

Прогнозы уровня воды составлялись для пяти районов северо-восточного Каспия, выбранных таким образом, чтобы учитывались морфометрические условия и специфика синоптических процессов, развивающихся в этом регионе. Однако, анализ полученных результатов проводился только на основе гидрометеорологической информации, полученной

со станции М Пешной. Это объясняется, как отсутствием пунктов наблюдений в других районах северо-восточного Каспия, так и тем, что район острова Большой Пешной наиболее подвержен сгонно-нагонным колебаниям. Значения прогнозируемого уровня на 00, +24, +48, +72, +96 и +120 часов у М Пешной были сравнены с фактическими.

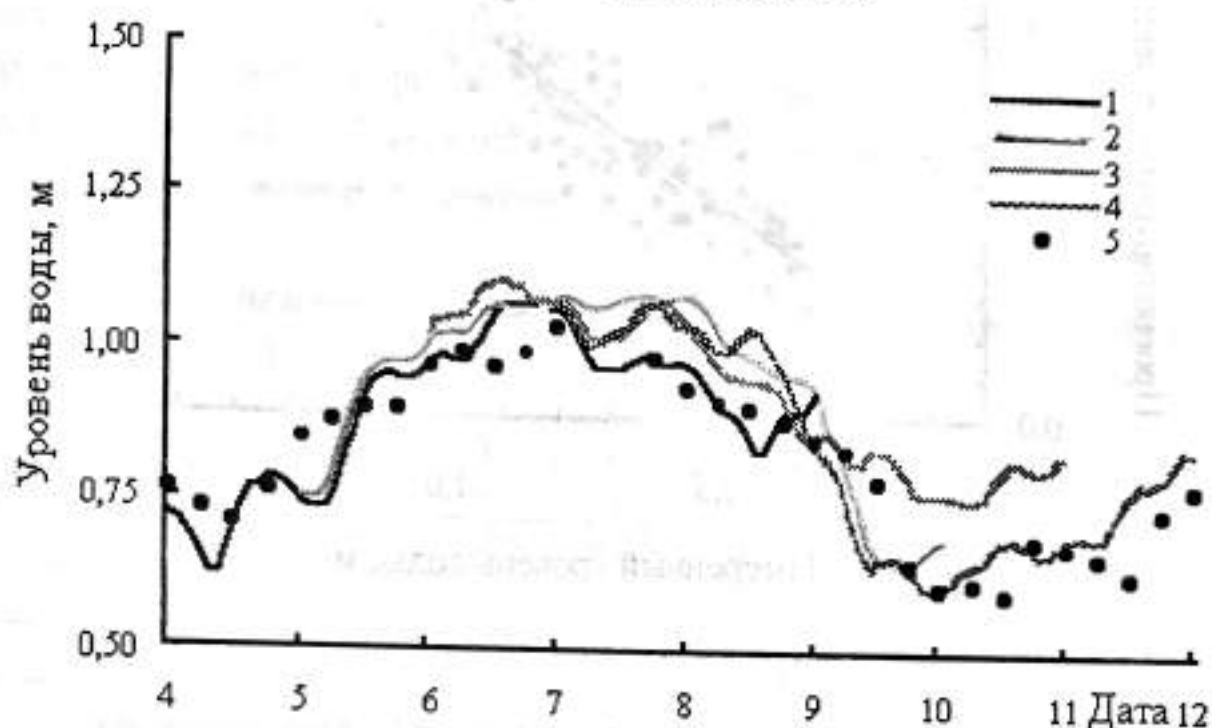
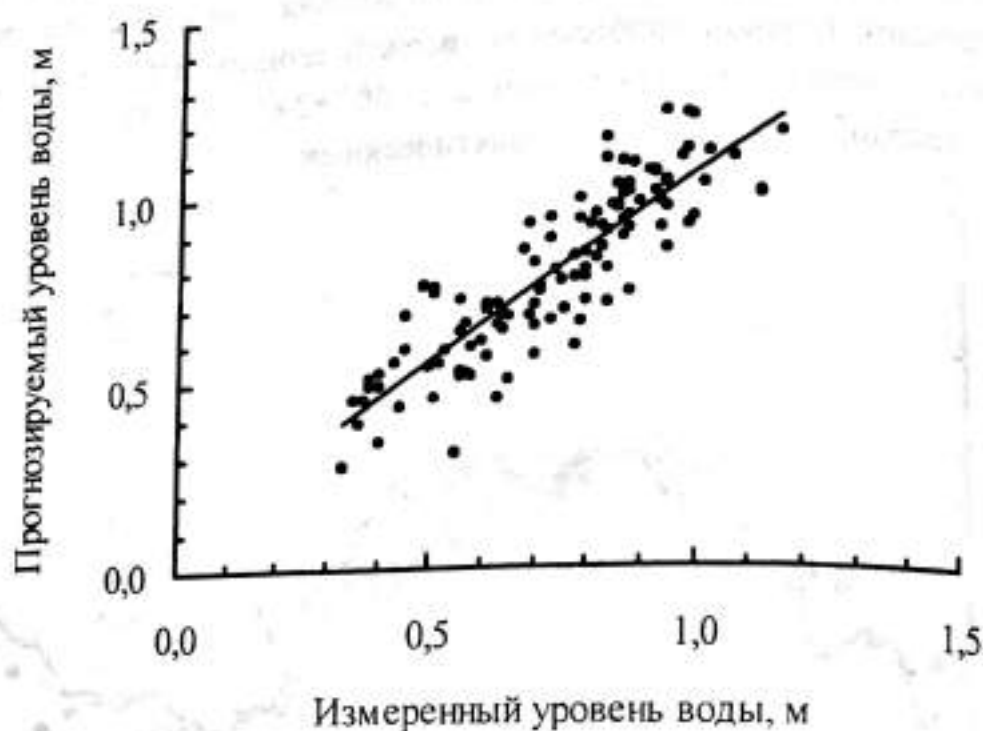


Рис. 1. Примеры прогнозов уровня воды у М Пешной (август 2001 г)  
 1- на период 4-9.08; 2- на период 5-10.08; 3- на период 6-11.08;  
 4- на период 7-12.08; 5- ход фактического уровня воды

Выполненные исследования показали, что при заблаговременности прогноза +24 часа коэффициент корреляции составил 0,87 и абсолютная ошибка 9 см (рис. 2), при заблаговременности +72 часа коэффициент корреляции составил 0,70 и абсолютная ошибка 13 см, при заблаговременности +120 часов коэффициент корреляции составил 0,62 и абсолютная ошибка 15 см. Необходимо отметить, что заблаговременность и точность прогноза нагонных колебаний уровня с использованием рассматриваемого метода зависит в основном от соответствия характеристик прогноза полей атмосферного давления и ветра. Действительно, исходя из анализа уравнений движения, используемых для расчета нагонных процессов, можно заключить, что ошибки в величине уровня должны зависеть не только от ошибок в метеорологических параметрах, но и от абсолютных значений скорости, направления и продолжительности действия ветра.





*Рис. 2. Сопоставление прогнозируемых (заблаговременность прогноза 24 ч) и измеренных уровней воды у М Пешной*

Поэтому, оценку точности численных гидродинамических методов расчета нагонных колебаний уровня при существующей точности получаемых и рассчитываемых метеорологических полей целесообразно проводить по данным о максимальных колебаниях уровня. Кроме того, при моделировании незначительных колебаний уровня, вызываемых малоградиентными барическими полями, относительные ошибки расчетных значений уровня резко возрастают в основном за счет увеличения ошибок в определении направления действующего ветра вследствие нерепрезентативности размытых барических полей в условиях редкой сети метеорологических станций на Каспийском море, особенно на его казахстанской части.

Оценка надежности и точности метода (табл.) проводилась в соответствии с ныне действующими нормативными документами [3, 5]. В соответствии с ними критерии качества метода прогноза, должны характеризовать одновременно как надежность метода, так и его эффективность. В качестве критерия применимости и качества метода принято отношение среднеквадратической ошибки ( $S$ ) к среднему квадратическому отклонению ( $\delta$ ). Отношение  $S/\delta$  является одновременно характеристикой надеж-

ности и эффективности, так как показывает выигрыш в распределении погрешностей, который дает метод прогноза по сравнению с распределением погрешностей в случае принятия ожидаемой величины к ее норме. Как видно из табл. критерий качества и обеспеченность ( $P$ ) находится в допустимых пределах даже при заблаговременности прогноза 120 часов, и, следовательно, использование метода является целесообразным. Как и ожидалось, коэффициент корреляции ( $R$ ), а также средняя абсолютная ошибка ( $\Delta$ ) с увеличением заблаговременности медленно уменьшается, что связано с точностью метеорологических прогнозов.

Таблица

Оценка точности и эффективности краткосрочных прогнозов уровня воды Каспийского моря у М Пешной за 2001 г

Заблаговременность, ч	$R$	$\Delta$ , м	$\delta$ , м	$0,674\delta$ , м	$S$ , м	$S/\delta$	$P$ , %
0	0,87	0,09	0,25	0,17	0,12	0,48	80
24	0,87	0,09	0,22	0,15	0,11	0,51	78
48	0,80	0,11	0,22	0,15	0,14	0,64	74
72	0,70	0,13	0,23	0,16	0,16	0,69	72
96	0,70	0,13	0,23	0,16	0,17	0,75	68
120	0,64	0,14	0,23	0,16	0,19	0,80	68

Таким образом, тестирование дало положительные результаты. Поэтому, система прогнозирования штормового нагона пригодна для оперативного использования. Ее применение позволит своевременно проводить гражданское предупреждение об опасных морских наводнениях и разрабатывать планы по стратегии в непредвиденных обстоятельствах в случаях затопления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивкина Н.И., Строева Т.П., Васенина Е.И. и др. К вопросу о создании батиметрической модели Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. - 1997. - № 2. - С.103-109.
2. Ивкина Н.И. Опыт применения гидродинамической модели MIKE 21 для прогнозирования сгонно-нагонных явлений на Каспийском море // Гидрометеорология и экология. - 1998. - № 1-2. - С. 105-112.
3. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1982 -143 с.



4. О методике прогноза нагонов на казахстанском побережье Каспийского моря // Шиварева С.П., Ивкина Н.И., Строева Т.П. и др. // Материалы Межд. науч.- практ. конф. «Проблемы гидрометеорологии и экологии». - Алматы: КазНИИМОСК. - 2001. - С. 125-137.
5. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Росгидромет, 1991 - 150 с.
6. Skill assessment of an operation hydrodynamic forecast system for North Sea and Danish Belts // Vested H.J., Woge Nielsen J., Jensen H.R. and Bolding Kristensen K. // Quantitative skill assessment for coastal ocean models. - 1995. - Vol. 47. - P. 373-396.
7. Vieira J., Fons J., Kofoed-Hansen H. Statistical and hydrodynamic models for the operational forecasting of floods in the Venice Lagoon // Coastal engineering. - 1993. - Vol. 21, № 4. - P. 301-331.
8. Warren I.R., Bach H.K. MIKE 21- a modeling system for estuaries, coastal waters and seas // Environmental software. - Vol. 7. - № 4. - 1992. - P. 229-240.

Датский гидравлический институт воды и охраны окружающей среды  
Научно-производственный Гидрометцентр РГП «Казгидромет»

### **КАСПИЙ ТЕҢІЗІНДЕГІ АПАТТЫ АҒЫСТАРДЫҢ АЛДЫН АЛУ ЖҮЙЕСІН ТЕСТІЛЕУДІҢ КЕЙБІР НӘТИЖЕЛЕРІ**

Х.Р. Йенсен

*Геогр. ғылымд. канд.*

Н.И. Ивкина

Т.П. Строева

*Мақалада жағалау аймағындағы трансформация мен Каспий теңізінің ағысты толқындарының жағалауға соғуы динамикасын сандық үлгілеу негізінде Каспий теңізіндегі апатты ағыстардың алдын алу жүйесін тестілеудің кейбір нәтижелері ұсынылған.*