

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ В БУХТЕ НАГАЕВА ОХОТСКОГО МОРЯ
С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 5 СУТОК**

*¹Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток;*

*²Колымское Управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Магадан*

Введение

Зона обслуживания ФГБУ «Колымское УГМС» включает открытые и прибрежные районы Охотского моря. Оперативные испытания системы (технологической линии) прогноза волнения в прибрежных районах Охотского моря (бухта Нагаева) с заблаговременностью до 5 суток проводились с 23 июня по 5 декабря 2021 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2021 год.

Система разработана в 2020 г. в ФГБУ «ДВНИГМИ». В её основе находятся две волновых модели последнего поколения. Расчет волнения производился автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов.

1. Автоматизированная система прогноза волнения

Система прогноза ветрового волнения в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт формирования карт и несколько модулей обработки информации.

Общее время работы оперативной технологии прогноза волнения по Тихому и Индийскому океанам, дальневосточным морям и районам Восточной Арктики достигает порядка трех часов на двух вычислительных кластерах (суммарно на 28 процессорах) ФГБУ «ДВНИГМИ». В современных условиях такие затраты времени не устраивают

пользователей. Кроме того, у потребителей имеются пожелания к освещению детальной информацией и других прибрежных акваторий зоны ответственности УГМС. Имеющиеся на настоящее время вычислительные возможности ФГБУ «ДВНИГМИ», а также в большинстве случаев их отсутствие в УГМС регионов Дальнего Востока, решить такую задачу не представляют возможным. Выход из подобной ситуации при минимальных затратах на приобретение новой вычислительной техники видится в следующем: разделение технологии прогноза на отдельные цепочки с использованием аналогии «клиент» – «сервер».

Основная идея заключается в том, чтобы отдельные задачи системы прогноза передать на места в Управления гидрометеорологической службы. На основном вычислителе ФГБУ «ДВНИГМИ» («сервер») производится прием входных потоков данных полей приводного ветра и сплоченности льда, расчет по дальневосточным морям с использованием глобальной модели волнения и подготовка начальных и граничных данных для расчета волнения по отдельным прибрежным районам. Эта информация сохраняется на ftp-сервере. В УГМС устанавливается прогностический комплекс волнения («клиент») прибрежных акваторий зон ответственности Управления. После приема «клиентом» начальных данных с «сервера» производится расчет волнения и формирование выходной продукции.

На «сервере» производится подготовка входной информации. По каналам сети Интернет с сервера NCEP/NCAR (<http://nomads.ncep.noaa.gov/>) скачиваются в автоматическом режиме файлы с прогнозами приводного ветра в коде GRIB2. Поскольку на каждый временной срок объем данных большой, составлен запрос, реализованный в программном скрипте, который позволяет получать с сервера только необходимую информацию в пределах расчетной области. Выбираются поля u и v компонент скорости приводного ветра на высоте 10 м. Разрешение сеточной области этих полей – $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Заблаговременность прогнозов до 120 часов, дискретность – 6 часов. Используются данные от срока 00 и 12 ч ВСВ. При расчетах волнения дополнительно используются поля сплоченности.

Далее составляется прогноз волнения при помощи дискретной спектральной модели WAVEWATCH III, версия 6.07 [4]. При прогностических расчетах учитываются все известные механизмы генерации и распространения волн. Функция источников и стоков включает в себя: генерацию волн ветром, диссипацию волнения на глубокой воде, нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения, диссипацию за счет трения о дно, опрокидывание волн (эффект серфинга) и взаимодействие волн со льдом.

Вывод информации производится с дискретностью 6 часов и включает в себя: высоту, период, направление и длину волны смешанного, ветрового волнения и зыби трех систем. Дополнительно записываются спектральные характеристики волн и скорость приводного ветра в расчетных узлах области.

На следующем этапе производится обработка выходных данных модели и запись в файлы текстового формата, которые обрабатываются и сохраняются для решения последующих задач как оперативного, так и климатического плана.

Построение прогностических карт производится при помощи программного продукта “The Generic Mapping Tools” [5]. На карты наносится высота смешанного волнения, направления подхода волн и положение ледяного поля.

После обработки прогностических данных автоматически производится подготовка начальных и граничных условий для прибрежных акваторий. Выбирается информация о скорости ветра, высоте, периоде и направлении волн для соответствующего прибрежного района и формируются файлы в формате, используемом в модели SWAN [3]. В том случае, когда море покрыто льдом, расчет по данному району не производится. Информация размещается на ftp-сервере ФГБУ «ДВНИГМИ».

ФГБУ «Колымское УГМС» («клиент») скачивает на свой компьютер эти данные и запускает скрипт расчета волнения для бухты Нагаева Охотского моря. Расчеты производятся по волновой модели SWAN версии 41.20, специально разработанной для прибрежных и мелководных зон. Расчетная сетка состоит из 116×34 точек с пространственным шагом 155×290 м. Дискретность вывода информации равна 6 часам.

Затем происходит обработка результатов работы модели SWAN. На выходе получаем карты по акватории и текстовый файл с прогнозами по отдельным, предварительно заданным пунктам (рис. 1). Текст содержит информацию: дата и время, наименование пункта, высота, период, направление волнения, скорость и направление ветра.

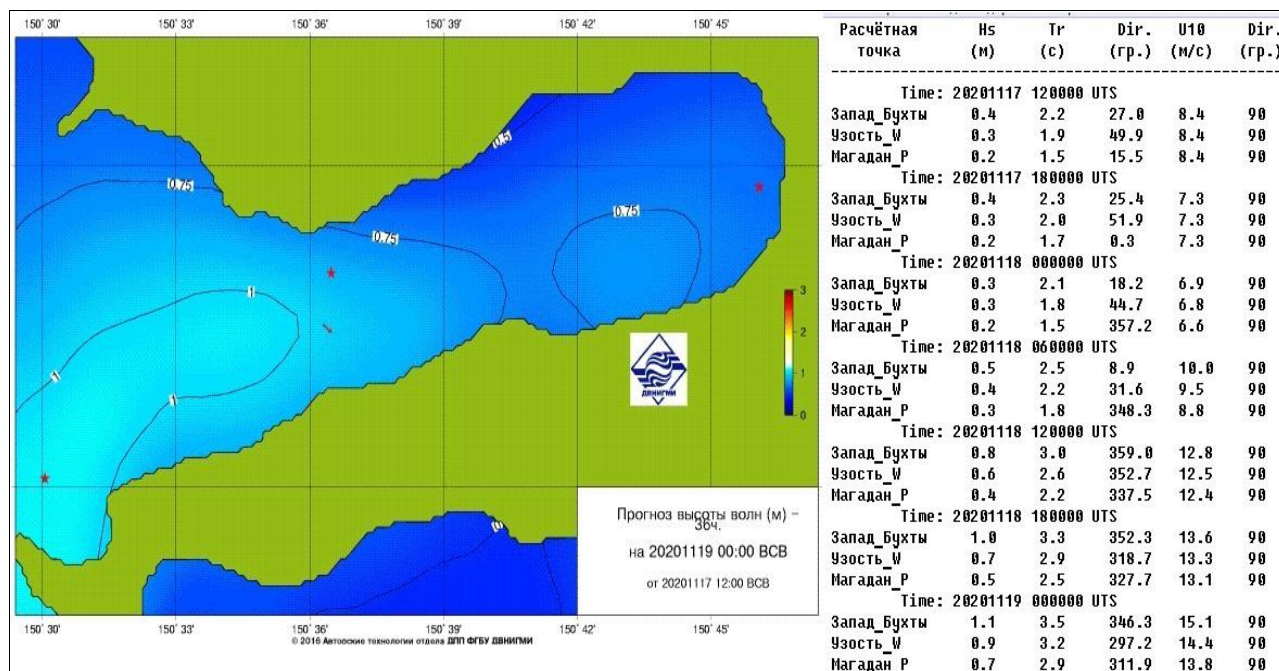


Рис. 1. Пример прогноза волнения по акватории бухты Нагаева.

2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

За период оперативных испытаний составлено 318 прогнозов. По техническим причинам потеряно 13. На эти даты информация не восстанавливалась.

Качество прогнозов высоты волн проводилась согласно Наставлению [1]. Допустимой ошибкой принималась величина, не более 30 % от наблюдаемого значения. В бухтах, небольших заливах, портах и на мелководье прибрежных зон прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 0,25 м [1, пункт 7.3.4.1.10].

Оценивалась высота волн в сравнении с данными наблюдений гидрометеорологической станции Магадан. Источник информации – телеграммы в коде КН-02 SEA.

Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах: *Bias* — систематическая ошибка, $|\bar{\Delta}|$ – средняя абсолютная ошибка, *RMSE* – средняя квадратическая ошибка, σ – стандартное отклонение от среднего, *r* – коэффициент корреляции, *P* – оправдываемость прогнозов (%).

2.1. Оценка качества прогнозов скорости приводного ветра

Прежде чем перейти к оценке высоты волн, рассмотрено качество исходной информации для прогнозов волнения, а именно, модуля скорости и направления приводного ветра на высоте 10 м полей GFS (глобальной прогностической системы). За время испытаний максимальная скорость составила по данным наблюдений 12 м/с. Прогностическая колебалась от 13 до 17 м/с в зависимости от заблаговременности. В табл. 1 и 2 приведены оценки в сравнении с наблюдениями на станции Магадан.

Критерий оправдываемости – $\pm 0,674\sigma$. Для модуля скорости σ равна 2,6 м/с, по направлению – 115°.

Таблица 1

Оценка качества прогнозов скорости ветра GFS в сравнении с наблюдениями на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , м/с	0,87	0,82	0,76	0,74	0,89	0,75	0,78	0,63	0,45	0,34
<i>RMSE</i> , м/с	2,32	2,30	2,17	2,30	2,50	2,47	2,47	2,53	2,46	2,58
$ \bar{\Delta} $, м/с	1,80	1,78	1,73	1,76	1,93	1,86	1,80	1,90	1,97	1,90
<i>r</i>	0,72	0,69	0,73	0,68	0,64	0,64	0,65	0,60	0,58	0,52
<i>P</i> , %	77,1	75,7	77,0	76,8	71,5	75,2	81,5	74,3	72,6	77,7

Оценка качества прогнозов направления ветра GFS в сравнении с наблюдениями
на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , °	-18	-15	-15	-17	-19	-12	2	-20	-14	3
<i>RMSE</i> , м/с	89	95	95	96	93	95	97	109	98	97
$ \bar{\Delta} $, м/с	67	69	69	72	70	74	72	78	75	71
<i>r</i>	0,67	0,62	0,62	0,63	0,66	0,59	0,61	0,54	0,56	0,59
<i>P</i> , %	60,7	59,7	59,7	58,5	62,0	54,6	63,0	55,7	53,3	57,6

Как видно из таблиц, хуже всего оправдывается направление ветра, при этом абсолютная ошибка в пределах 70°, что является большой величиной. Согласно Наставлению [1], оценка по критерию *P* – неудовлетворительная. Для скорости ветра *P* в среднем равна 76 %, и начиная с третьих суток прогноза имеет удовлетворительную оценку.

2.2. Оценка качества прогнозов волнения

По данным телеграмм кода КН-02 SEA, наблюдения за волнением на прибрежной станции Магадан проводятся в сроки 00 и 06 ч ВСВ. Оценивалось качество прогнозов высот волн 13%-ной обеспеченности, или 1/3 значительных волн по международной классификации только за срок 00 ч, что соответствовало заблаговременностям, кратным 12 часам.

За период оперативных испытаний наблюдался максимум высот волн 0,5 м. Среднее арифметическое равно 0,22 м, $\sigma = 0,12$ м. Повторяемость штилей составила 15,9 %, высот волн от 0,1 до 0,3 м – 79,3 %.

В табл. 3 приведены результаты оперативных испытаний. Максимальная прогностическая высота волны (h_{max}) отличается от наблюдаемой не более чем на 10 см. Абсолютная и средняя квадратическая ошибки находятся в пределах σ . Значение коэффициента корреляции невелико, и минимум приходится на заблаговременность в 5 суток, но он значим с вероятностью 0,01 (1 %). По величине оправдываемости оценка прогноза отличная (> 93 % для краткосрочного и >90 % для среднесрочного).

В связи с тем, что колебания анализируемых рядов незначительное (в пределах 0,1–0,3 м), все ошибки не превышают точность измерения волн в 10 см.

Согласно [1, п. 7.3.4.1.13], направление ветровых волн не оценивается, но поскольку при прогнозе выдается и угол подхода, проведена оценка точности и направления. В табл. 4 представлены результаты по сравнению с наблюдениями.

Оценка качества прогнозов высот волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
h_{\max} , м	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5
$Bias$, м	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02
$RMSE$, м/с	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
$ \Delta $, м/с	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09
r	0,44	0,40	0,47	0,43	0,41	0,42	0,38	0,41	0,32	0,22
P , %	92,1	93,1	95,7	95,8	94,2	95,7	95,5	94,3	93,3	92,8

Таблица 4

Оценка качества прогнозов направления подхода волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
$Bias$, °	-25	-14	-31	-26	-32	-24	-23	-32	-2	-18
$RMSE$, м/с	107	108	98	101	99	101	105	101	115	107
$ \Delta $, м/с	88	88	84	87	84	85	88	88	96	90
r	0,64	0,63	0,72	0,71	0,73	0,70	0,68	0,72	0,58	0,64
P , %	46,4	50,0	43,9	47,9	47,4	46,1	47,4	47,9	44,4	44,6

Оправдываемость по направлению рассчитывалась согласно критерия не превышения $0,674\sigma$. Исходя из всех статистик, можно сделать вывод о неудовлетворительном прогнозе направления. Причина этого – неточности в данных ветра, для чего и была выше проведена оценка полей GFS.

2.3. Сравнение с другими методами

Дополнительно рассчитывалась высота волны по формулам полуэмпирического метода ФГБУ «ГОИН» – АО «Союзморниипроект» [2], на основании которых построена номограмма, используемая в оперативной работе Управлений Росгидромета.

Расчет проводился по скорости ветра в точке, используя данные из файла результатов модели SWAN. Таким образом, входные данные по ветру едины, как для модели SWAN, так и при расчете по номограмме. В табл. 5 приведены оценки качества прогнозов и эффективность испытываемой технологии по сравнению с полуэмпирическим методом.

Коэффициенты корреляции табл. 3 и 5 находятся в пределах доверительных интервалов (0,05–0,06), по остальным статистикам наблюдается уменьшение ошибок для испытываемой

технологии. Эффективность, в среднем по всем заблаговременностям, равна 5,7 %, что говорит о преимуществе автоматизированной системы прогноза волнения.

Таблица 5

Оценка качества прогнозов высот волн по методу ГОИН – Союзморниипроект

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
h_{\max} , м	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
$Bias$, м	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,07	-0,08
$RMSE$, м/с	0,15	0,14	0,14	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,17
$ \Delta $, м/с	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13
r	0,52	0,51	0,50	0,48	0,48	0,49	0,49	0,41	0,37	0,31
P , %	87,1	88,9	87,8	88,0	89,1	87,2	89,6	91,4	88,9	87,8
$P_{мет} - P_{ГОИН}$	5,0	4,2	7,8	7,8	5,1	8,5	6,0	2,9	4,4	5,0

При сравнении с инерционным прогнозом на 24 часа (табл. 6), разработанная технология имеет меньшую среднеквадратическую ошибку и преимущество по эффективности. Коэффициент корреляции инерционного метода значим с вероятностью 10 %.

111

Таблица 6

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

$Bias$, м	$RMSE$, м	$ \Delta $, м	r	P , %	$P_{мет} - P_{инерц}$
0,0	0,15	0,11	0,15	90,3	2,8

Заключение

Автоматизированная система разработана с использованием аналога технологий «клиент» – «сервер», что позволяет задействовать вычислительные возможности ФГБУ «Колымское УГМС» и уменьшить время на составление прогноза.

В процессе оперативных испытаний системы прогноза волнения прибрежной зоны установлено, что технология работоспособна и ее можно тиражировать на другие акватории. Полученные оценки качества прогнозов показали преимущество по сравнению с инерционным и полуэмпирическим методами.

Точность прогноза волнения сильно зависит от качества исходной информации, в данном случае от скоростей приводного ветра. Ошибки в направлении ветра приводят к

неудовлетворительному результату прогнозирования угла подхода волн. Необходимо проведение работ по уточнению данного параметра или использованию полей ветра атмосферных моделей с меньшим пространственным шагом сеточной области.

Среднеквадратическая и абсолютная ошибки сравнимы с точностью визуального наблюдения за высотами волн. Оправдываемость прогноза превышает 92 %, что относится к категории хороших и отличных прогнозов для всех заблаговременностей.

Результаты испытаний 29 марта 2022 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала методику к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Колымского УГМС».

Список литературы

1. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.
2. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.
3. SWAN. User manual / Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2020. – 143 p. – URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (дата обращения 2020-11-25)
4. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2019. – 466 p. – URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Tech-Docs/manual.pdf> (дата обращения 2020-11-25).
5. *Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F.* The Generic Mapping Tools. GMT Tutorial. URL: http://gmt.soest.hawaii.edu/doc/5.4.4/pdf/GMT_Tutorial.pdf (Дата обращения 2018-11-22).