

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)  
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ  
В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ**

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

**Введение**

Арктическим морям уделяется большое внимание как важному с экономической точки зрения региону. Прогнозы волнения востребованы при гидрометеорологическом обеспечении Северного морского пути и проведении хозяйственной деятельности в прибрежной зоне.

Восточно-Сибирское и Чукотское моря входят в зону обслуживания ФГБУ «Чукотское УГМС». Оперативные испытания системы прогноза ветрового волнения в прибрежных районах этих морей проводились с 6 июня по 6 ноября 2022 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2022 год.

Технология разработана в 2017 г. в отделе долгосрочных прогнозов погоды и изучения климата ФГБУ «ДВНИГМИ», в 2021 г. она была модифицирована. Расчеты производятся автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов. Вся информация выставляется на сайте ФГБУ «ДВНИГМИ».

**1. Автоматизированная система прогноза волнения**

Технология прогноза ветрового волнения по морям Восточной Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское) и в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт графического отображения и несколько модулей обработки информации. По сравнению с оперативной линией 2018 г. [1], были внесены следующие изменения.

– Произведена замена версий моделей. По морям используется WAVEWATCH III версии 6.07 [6], в прибрежных районах – SWAN версии 41.31 [5]. В моделях учитываются источники поступления энергии от ветра и диссипации энергии, нелинейное взаимодействие волн и влияние придонного трения.

– Построена новая расчетная сетка для модели WAVEWATCH III с тремя масштабами пространственного разрешения: в прибрежной зоне 4'×2', в открытой части морей 8'×4' и 16'×8', что соответствует шагу 4–8–16 км. Границы области: 138° в. д. – 153° з. д., 65,0167° с. ш. – 81,0167° с. ш. Общее количество расчетных узлов равно 23580.

– Для пунктов в районе прибрежных станций Амбарчик, Рау-Чуа, Айон, Валькаркай, Ванкарем и Уэлен, по результатам авторских испытаний 2021 г., построены регрессионные уравнения, уточняющие модельную высоту волны.

– Используются прогнозы скоростей приводного ветра на высоте 10 м модели ICON [4] (<https://opendata.dwd.de>) с пространственным разрешением ~15 км.

– Автоматически усваиваются ежедневные поля сплоченности льда, осредненные за пять дней, Японского агентства аэрокосмических исследований, Исследовательского центра наблюдения Земли с шагом сетки ~3'×3' ([https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes\\_climate\\_map\\_v3.cgi?lang=en](https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes_climate_map_v3.cgi?lang=en)).

Расчетные области прибрежных районов модели SWAN остались без изменений. Пространственный шаг сеточной области для всех прибрежных акваторий один и составляет 30"×30", что приблизительно составляет 400×900 м.

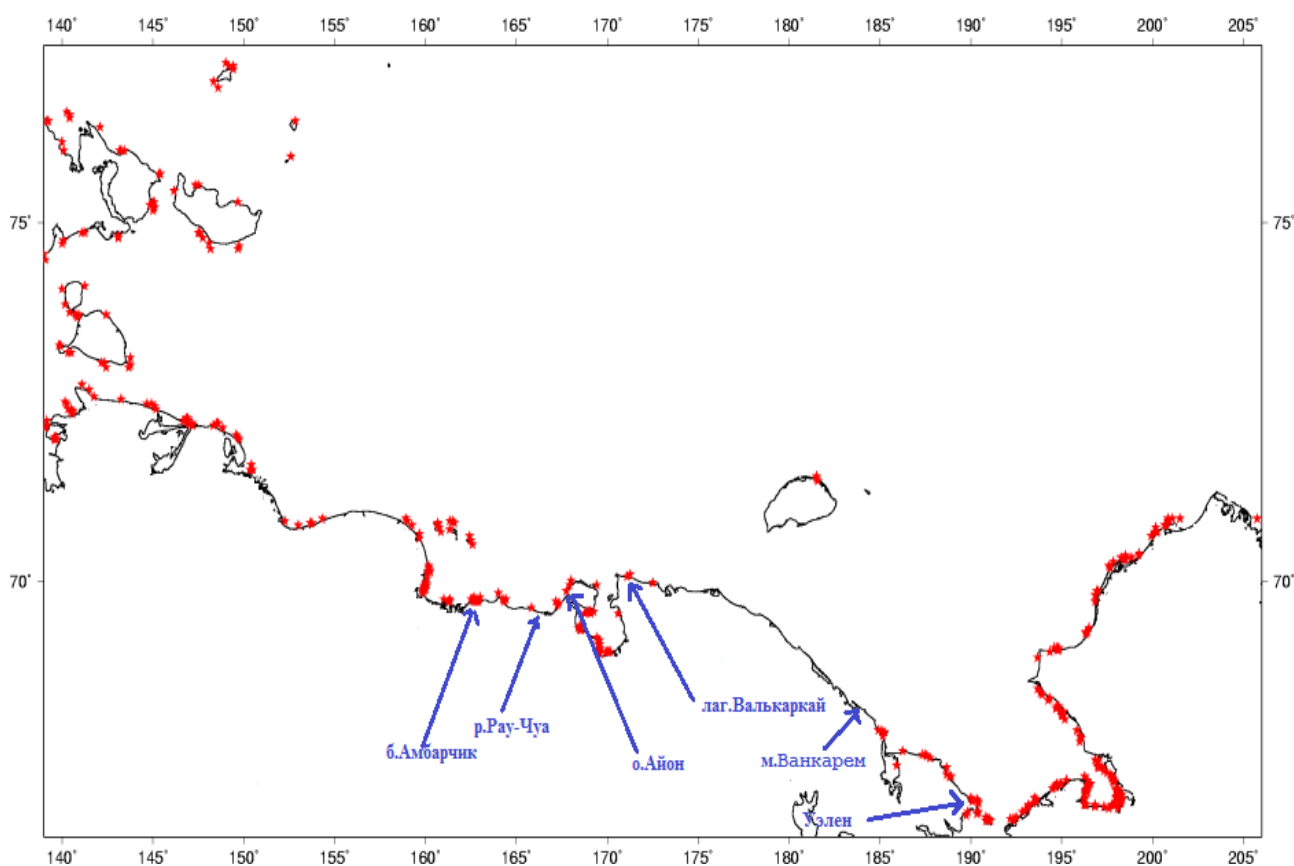
Процедура расчета волнения состоит из двух этапов. Прогноз по Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям производится по модели WAVEWATCH. После обработки прогностических данных, а именно, подготовки начальных и граничных условий, на втором этапе с использованием SWAN рассчитывается волнение в прибрежных районах. Дискретность вывода информации двух моделей равна 3 часам.

Продукция системы прогноза (карты и текстовый файл по девяти прибрежным станциям) выставляется дважды в сутки по сети Интернет на Web-странице ФГБУ «ДВНИГМИ» (<http://www.ferhri.org/prognozy/2017-07-26-04-47-44/62-volnenie-model-ww-III-otv-isp-vrazhkin-a-n.html>).

Использование всех этих изменений технологии позволило сократить время расчетов в 1,5 раза по сравнению с предыдущей оперативной версией 2018 года.

## 2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

Качество прогнозов высот волн оценивалось по данным, полученным со спутника Saral программы Aviso (<ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub>). При обработке данных модели WAVEWATCH использовалась высота волн 13%-ной обеспеченности (высота значительных волн), или по международной классификации «средняя высота 1/3 наивысших волн». Рассматривались только точки в прибрежной 4-километровой полосе морей. Характеристики волн этой зоны используются как граничные условия модели SWAN при составлении прогнозов в районах расположения прибрежных станций. На рис. 1 показаны точки, для которых получены статистические оценки.



**Рис. 1.** Точки оценки высот волн по спутниковым наблюдениям (красные звездочки) и прибрежным станциям (синие стрелки).

Точность прогнозов высоты волн оценивалась согласно Наставлению [2]. В качестве допустимой ошибки прогноза принималась величина, равная 30 % от наблюдаемого значения. В морях прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 1,0 м. В прибрежных мелководных районах, бухтах, портах – при любой действительной высоте волн от 0 до 0,2 м. Данные наблюдений на шести станциях (рис. 1) получены из телеграмм КН-02 МОРЕ на срок 00 ч ВСВ.

В табл. 1 приведены оценки качества высот волн за период проведения оперативных испытаний. Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах:  $t$  – заблаговременность (часы),  $Bias$  – систематическая ошибка (м),  $|\bar{\Delta}|$  – средняя абсолютная ошибка (м),  $\bar{q}$  – средняя относительная ошибка (%),  $\bar{S}$  – средняя квадратическая ошибка,  $\sigma$  – стандартное отклонение от среднего,  $r$  – коэффициент корреляции,  $SI$  – индекс рассеивания, или разброс ошибок,  $P$  – оправдываемость (%).

Таблица 1

Показатели качества прогнозов высот волн в прибрежных районах морей  
Восточной Арктики

$t$	$Bias$	$ \bar{\Delta} $	$\bar{q}$	$\bar{S}$	$r$	$SI$	$S/\sigma$	$P$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прибрежная 4-км зона								
6	-0,14	0,23	9,1	0,31	0,77	0,48	0,76	94,1
18	-0,15	0,23	9,1	0,30	0,78	0,48	0,77	94,5
30	-0,15	0,24	9,6	0,31	0,77	0,49	0,77	94,4
42	-0,15	0,23	9,2	0,30	0,79	0,47	0,74	94,8
54	-0,18	0,26	10,5	0,33	0,74	0,52	0,83	92,9
66	-0,17	0,26	10,2	0,33	0,74	0,51	0,82	93,8
78	-0,15	0,27	10,8	0,34	0,70	0,54	0,86	94,2
90	-0,17	0,26	10,6	0,35	0,68	0,55	0,88	94,6
102	-0,21	0,30	12,0	0,38	0,69	0,60	0,94	92,1
114	-0,19	0,31	12,3	0,38	0,62	0,62	0,98	90,4
Станция Амбарчик								
12	0,02	0,13	14,6	0,17	0,72	0,51	0,78	89,7
24	0,03	0,13	14,5	0,18	0,72	0,50	0,77	90,7
36	-0,04	0,13	14,5	0,17	0,71	0,50	0,77	90,7
48	-0,04	0,14	16,1	0,18	0,70	0,53	0,80	91,8
60	-0,01	0,13	14,9	0,17	0,71	0,51	0,78	89,4
72	-0,05	0,17	18,5	0,22	0,55	0,53	1,00	86,9
84	-0,03	0,18	19,6	0,23	0,47	0,66	1,02	80,0
96	-0,03	0,17	18,9	0,22	0,52	0,64	0,98	89,3
108	-0,02	0,18	20,6	0,24	0,45	0,69	1,06	84,5
120	-0,09	0,18	19,9	0,22	0,46	0,65	1,00	84,0
Станция Рау-Чуа								
12	0,00	0,04	9,8	0,08	0,64	0,57	0,78	92,2
24	0,00	0,05	9,6	0,09	0,62	0,58	0,79	92,0
36	0,00	0,04	8,8	0,08	0,64	0,56	0,81	92,0
48	0,00	0,05	9,8	0,09	0,55	0,61	0,88	89,8
60	0,01	0,04	8,6	0,08	0,60	0,57	0,90	95,9
72	0,00	0,04	7,5	0,07	0,64	0,51	0,79	97,9
84	0,00	0,04	7,0	0,07	0,55	0,55	1,00	97,9
96	0,00	0,04	8,5	0,08	0,35	0,61	1,10	97,9
108	0,00	0,04	7,9	0,08	0,43	0,59	1,08	95,8
120	0,00	0,02	5,3	0,06	0,59	0,46	0,82	97,8

Станция Айон								
12	0,00	0,10	6,8	0,13	0,86	0,58	0,51	93,2
24	0,00	0,10	6,7	0,13	0,88	0,55	0,49	93,0
36	0,00	0,10	6,8	0,14	0,85	0,60	0,53	94,8
48	0,00	0,12	6,2	0,12	0,89	0,51	0,45	91,1
60	-0,01	0,12	6,8	0,12	0,88	0,54	0,48	91,2
72	-0,02	0,10	7,0	0,13	0,88	0,54	0,49	92,7
84	-0,01	0,10	6,8	0,14	0,85	0,59	0,54	96,4
96	-0,02	0,11	7,2	0,13	0,88	0,53	0,49	92,5
108	-0,02	0,11	7,6	0,14	0,86	0,58	0,54	90,9
120	-0,04	0,12	8,1	0,15	0,85	0,60	0,55	94,1
Станция Валькаркай								
12	-0,09	0,13	10,8	0,19	0,74	0,44	0,77	90,3
24	-0,08	0,13	10,7	0,18	0,74	0,44	0,75	88,2
36	-0,08	0,13	9,8	0,19	0,73	0,44	0,75	88,4
48	-0,07	0,12	8,9	0,17	0,78	0,40	0,73	90,2
60	-0,08	0,13	9,8	0,18	0,70	0,45	0,79	88,2
72	-0,10	0,15	11,2	0,20	0,66	0,48	0,86	90,0
84	-0,10	0,14	18,0	0,20	0,49	0,50	1,03	90,0
96	-0,08	0,14	17,8	0,20	0,42	0,52	1,05	89,8
108	-0,09	0,16	20,0	0,22	0,38	0,56	1,13	86,0
120	-0,08	0,15	18,9	0,20	0,42	0,52	1,05	85,1
Станция Ванкарем								
12	-0,01	0,21	14,0	0,31	0,66	0,71	0,76	90,7
24	-0,01	0,20	13,6	0,29	0,74	0,65	0,68	85,4
36	-0,03	0,24	16,2	0,34	0,58	0,84	0,86	85,2
48	-0,03	0,24	16,2	0,36	0,58	0,85	0,86	85,2
60	-0,02	0,23	15,4	0,33	0,68	0,73	0,74	83,3
72	-0,02	0,23	15,4	0,32	0,68	0,73	0,74	83,3
84	-0,02	0,24	16,1	0,35	0,64	0,78	0,79	84,9
96	-0,02	0,24	15,9	0,32	0,71	0,70	0,73	84,3
108	-0,02	0,26	17,4	0,39	0,58	0,80	0,83	84,3
120	-0,01	0,26	17,0	0,38	0,63	0,82	0,84	85,1
Станция Уэлен								
12	-0,04	0,26	10,2	0,35	0,83	0,39	0,56	87,4
24	-0,04	0,27	10,9	0,37	0,81	0,42	0,60	84,1
36	-0,05	0,28	11,1	0,38	0,80	0,43	0,61	83,7
48	-0,04	0,31	12,4	0,43	0,73	0,49	0,70	84,9
60	-0,04	0,33	13,2	0,44	0,71	0,51	0,71	83,5
72	-0,10	0,34	13,6	0,48	0,62	0,56	0,81	83,3
84	-0,08	0,47	13,3	0,47	0,68	0,55	0,77	85,5
96	-0,07	0,33	13,3	0,47	0,67	0,55	0,77	85,5
108	-0,02	0,38	15,0	0,50	0,64	0,56	0,81	83,1
120	0,01	0,38	14,7	0,53	0,59	0,61	0,87	80,0

По величине  $P$  прогнозов модели WAVEWATCH в прибрежных районах Восточной Арктики превышает 90 %. В районе станций, по SWAN, колеблется от 97 до 80 % с заблаговременностью до 120 часов. К неудовлетворительным оценкам необходимо отнести превышение  $SI$  уровня 0,4.

С учетом количественных значений основных статистических критериев ( $S/\sigma$ ,  $r$ ,  $P$ ) можно рекомендовать использование прогнозов для станций Айон, Ванкарем и Уэлен с заблаговременностью до 120 часов; Валькаркай – 72 часа; Амбарчик – 60 часов и Рау-Чуа – 48 часов.

### 3. Сравнение с другими методами и анализ ошибок

Оценки качества инерционных прогнозов на 24 часа по прибрежным станциям приведены в табл. 2. По комплексу всех оценок преимущество этого прогноза над методическим наблюдается для станции Рау-Чуа. Для Айона – только по эффективности и абсолютной ошибке, по остальным статистикам – выигрыш методического прогноза. По станциям Валькаркай и Ванкарем, в комплексе, методический лучше, но эффективность менее 1 %. Абсолютное преимущество получено для станций Амбарчик и Уэлен.

Таблица 2

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

Станция	$Bias$	$ \bar{\Delta} $	$\bar{q}$	$\bar{S}$	$r$	$SI$	$S/\sigma$	$P$	$P_m - P_u$
Амбарчик	0,00	0,21	20,9	0,29	0,31	0,76	1,17	74,3	16,4
Рау-Чуа	-0,07	0,04	5,6	0,09	0,80	0,53	0,61	94,4	-2,4
Айон	-0,02	0,06	3,8	0,16	0,72	0,70	0,69	98,7	-5,7
Валькаркай	-0,02	0,17	12,9	0,24	0,68	0,50	0,77	87,5	0,7
Ванкарем	-0,02	0,22	14,9	0,42	0,52	1,01	0,95	86,3	-0,9
Уэлен	-0,02	0,46	18,6	0,61	0,49	0,70	0,99	71,0	13,1

В сравнении с оперативной технологией 2018 года [1], новый модифицированный вариант системы позволяет использовать прогнозы по всем прибрежным пунктам. Ранее наблюдались неудовлетворительные прогнозы волнения в трех из четырех районов, а именно: Амбарчик, Айон и Валькаркай (по комплексу всех статистик). Лучшие прогнозы получены по оперативной версии 2018 г. для Уэлена.

Рассмотрим причины ошибок. При оценке прогнозов скорости ветра модели ICON по станциям было выявлено, что, за исключением Валькаркай и Уэлена, по модулю скорости с заблаговременностью до двух суток оценка удовлетворительная. По направлению – для всех станций оценки неудовлетворительные. Это основная причина ошибок, влияющая на качество прогнозов волнения. Сравнительный анализ скоростей приводного ветра по моделям ICON (данные за 2022 г.) и GFS (данные за 2021 г. с пространственным шагом полей  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) не показал однозначного преимущества одной над другой. Для станции

Уэлен причина удачных прогнозов волнения по технологии 2018 г. над новой объясняется более близкими к наблюдениям расчетной скорости ветра GFS.

Вторая причина – несоответствие координат реального расположения прибрежных станций, указанных в различных справочниках по климату, что усложняет выбор модельной точки, совпадающей пункту наблюдения. Для решения этой проблемы привлекалась компьютерная программа Google Earth. Рассматривалось спутниковое изображение местности и предположительное расположение станции (населенного пункта).

К третьей причине ошибок необходимо отнести большой шаг расчетной сетки модели SWAN (30"×30"), построенной по архиву батиметрии GEBCO. Согласно Руководства [3], при визуальном наблюдении за волнением на расстоянии до 100 м высота пункта наблюдения должна составлять 5–6 м, что не на всех станциях имеется. Перепад глубин на таком расстоянии может составлять от 1 до 10 м. При высоте волны более 0,5 м это уже существенно влияет на качество прогноза. И по этой причине сложно подобрать расчетный узел модели, который соответствует реальному пункту наблюдения.

### **Заключение**

Автоматизированная система прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики является продолжением ранее разработанной технологии (2018 г.), созданной в ФГБУ «ДВНИГМИ». По результатам оперативных испытаний получены оценки качества расчетных высот волн. Так, в 4-километровой прибрежной зоне можно использовать данные модели WAVEWATCH, около гидрометеорологических станций (порядка 200 м от берега) – модели SWAN с учетом регрессионных зависимостей.

Получено преимущество новой системы по сравнению с аналогичными прогнозами технологии 2018 г. по всем прибрежным станциям, кроме Уэлена.

Результаты испытаний 21 марта 2023 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала ФГБУ «ДВНИГМИ» внедрить усовершенствованную технологию и обеспечить передачу прогнозов с использованием каналов связи Интернет, а ФГБУ «Чукотское УГМС» использовать в оперативной работе продукцию системы в качестве вспомогательного метода.

### **Список литературы**

1. *Вражкин А.Н.* Автоматизированная система прогноза волнения прибрежной зоны Чукотского и Восточно-Сибирского морей. - URL: <http://method.meteorf.ru/methods/sea/shore.pptx>

2. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.

3. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.

4. *Prill F., Reinert D., Rieger D., Zängl G.* ICON Tutorial: Working with the ICON. Deutscher Wetterdienst (DWD). – 2020. – 278p. – DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/icon tutorial2020.

5. *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)

6. *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).