

УДК 551.46

Оценка параметров волн зыби для прогнозирования штормовых ситуаций

П.Д. Ковалев¹, Д.П. Ковалев¹, М.О. Хузеева²

¹ *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия;*

² *Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Южно-Сахалинск
kovalev_pd@outlook.com

Проведено дальнейшее детальное изучение штормовых волн на Юго-Восточном побережье о. Сахалин с использованием данных измерений волн, полученных в двух точках прибрежной зоны, и синоптических карт. Установлено, что периоды зыби перед штормом уменьшались по нелинейному закону. Анализ синоптических карт показал, что циклоны, движущиеся над азиатским континентом на восток или с юга на северо-восток по мере продвижения на восток способствуют развитию ветров северо-восточного направления над Японским морем. Именно эти синоптические ситуации вызывают генерацию длинных волн зыби в Японском море, которая приходит в район расположения волномера. Оценки скорости изменения периода зыби во времени показали, что период волн уменьшается со временем нелинейно и аппроксимируется полиномиальным уравнением. Проведенные расчеты изменения скорости периодов зыби позволяют оценить время прихода шторма к месту наблюдения с использованием измеренных периодов зыби и применять его вместе с другой гидрометеорологической информацией в качестве предвестника шторма, позволяющего повысить безопасность плавания маломерных судов.

Ключевые слова: волны зыби, дисперсионные свойства волн, групповая скорость

Estimation of swell parameters for the storm prediction

P.D. Kovalev¹, D.P. Kovalev¹, M.O. Khuzeeva²

¹ *Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;*

² *Sakhalin Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
kovalev_pd@outlook.com

A further detailed study of storm waves on the southeastern coast of Sakhalin Island is carried out using data of swell measurements at two points of the coastal zone and weather charts. It is found that the periods of swell before the storm decreased following the nonlinear law. The analysis of weather charts revealed that the cyclones moving over the Asian continent to the east or from the south to the northeast as they move to the east contribute to the development of northeastern winds over the Sea of Japan. These are the synoptic conditions which cause the generation of long waves of swell in the Sea of Japan which comes to the area of the wave gage location. The estimates of the rate of temporal variation in the swell period showed that the wave period decreases with time nonlinearly and is approximated by a polynomial. The calculations of the swell

period variation rate allow estimating the time of the storm arrival to the observation point based on the measured swell periods and using it together with other hydrometeorological information as a storm harbinger which allows increasing the safety of small-size vessel navigation.

Keywords: swell, wave dispersion properties, group velocity

Введение

Многолетние наблюдения за волнением в прибрежной зоне юго-восточной части о. Сахалин показали, что в этом районе может наблюдаться три-четыре шторма в месяц. Поскольку данный район активно используется для прибрежного рыболовства, информация о подходе шторма является необходимой, чтобы успеть вовремя убрать мелкие рыболовные суда в укрытие или вытащить их на берег.

По полученным временным рядам колебаний уровня моря (волнения) нами было установлено, что в рассматриваемом регионе задолго до подхода шторма наблюдается увеличение амплитуды волн зыби, периоды которых уменьшаются с приближением шторма. Этим исследованиям для рассматриваемого региона посвящена работа [1]. Однако в ней рассмотрены только первые, предварительные результаты без детального анализа.

При шторме обычно генерируется волны разной длины, наиболее длинные из которых перемещаются быстрее. На этом основании Барбер и Урселл [6] пришли к заключению, что распространение зыби является линейным процессом, так что волны различных длин и периодов ведут себя независимо друг от друга. А поскольку длинные волны зыби распространяются быстрее по сравнению со скоростью перемещения циклона, вызывающего шторм, то они могут служить предвестником.

Тема исследований – «предвестники шторма» – достаточно интересная, хотя сам факт дисперсии зыби, благодаря чему длинные волны зыби приходят ранее шторма, давно уже известен. Тем не менее данная тема как-то выпала из поля зрения океанологов, и, кроме опубликованных в 1962 году результатов исследований [11], значимые работы по этой тематике не проводились. К тому же описанные в упомянутой работе исследования были выполнены с использованием аппаратуры с невысокой для сегодняшнего времени точностью измерений, да и обработка проводилась на медленных компьютерах с более простым программным обеспечением.

В [4] описан метод определения времени прихода шторма в точку наблюдения с использованием нескольких параметров, таких как высота волн в области шторма, расстояние от границы шторма до расчетной точки, что далеко не всегда возможно и может приводить к большим ошибкам еще по причине диссипации. В то же время предлагаемый нами принцип определения времени прихода шторма использует один параметр волнения, измеренный непосредственно в точке наблюдения.

Исследования по рассматриваемой тематике проводились в различных районах Мирового океана, но для рассматриваемого здесь района, имеющего свои батиметрические и орографические особенности, такие исследования проводятся впервые. Не следует также делать вывод, что полученные результаты позволяют однозначно определить приход шторма. Необходимо учитывать и другие информационные источники, поскольку циклон может изменить направление и не прийти к точке наблюдения. И только при комплексном подходе к прогнозированию прихода шторма получится наиболее достоверный результат.

Измерения

Предварительный анализ раннего прихода зыби проводился по наблюдениям волнения, проводимым ИМГиГ ДВО РАН с 2002 года в прибрежной зоне о. Сахалин и Курильских о-вов. Все они имеют схожий характер, поэтому за основу данных, использованных для анализа, были взяты измерения волнения в юго-восточной части о. Сахалин в 2012 г. в летнее время при отсутствии ледяного покрова. При этом были выбраны месяцы с максимальным числом циклонов. Также привлекались данные по прохождению циклонов в рассматриваемом районе, любезно предоставленные ФГБУ «Сахалинское УГМС». На рис. 1 приведена карта района наблюдений и указаны места постановки приборов.



Рис. 1. Карта района проведения наблюдений и положение станций измерения волнения.

Fig. 1. Map of the observation area and the position of the wave measurement stations.

Следует отметить, что было установлено три прибора, последний из которых располагался на расстоянии около 200 м от прибора вблизи с. Охотское и ближе к берегу на глубине около 3 м. Однако совместная обработка его рядов наблюдений дополнительной информации по рассматриваемой теме не дала, поэтому эти данные здесь не рассматриваются.

Для регистрации использовались приборы АРВ-14 с секундной дискретностью измерений, осуществлялась синхронная запись волнения всеми приборами. Расстояние между приборами составляло около 16,5 км, что позволяло определить расстояние до шторма более точно. Временной ход колебаний уровня моря приведен на рис. 2.

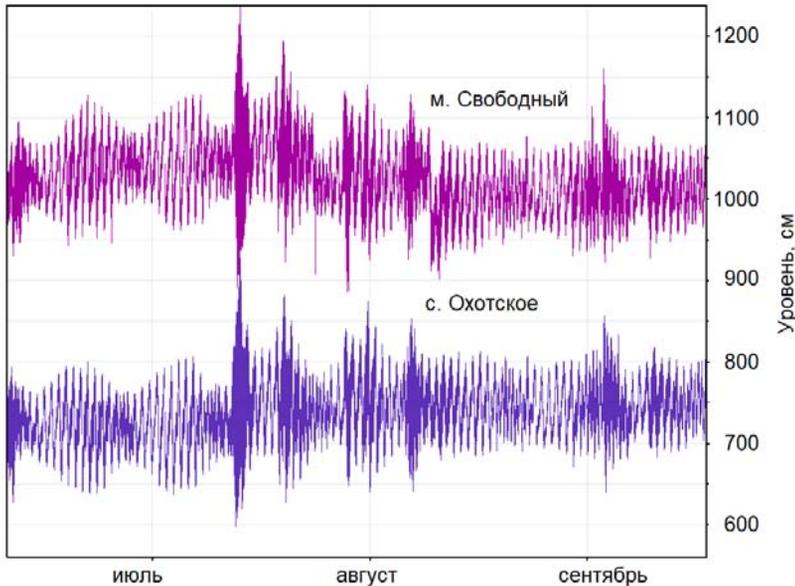


Рис. 2. Синхронные временные ряды колебаний уровня моря в 2012 г. Приборы установлены вблизи с. Охотское и м. Свободный.

Fig. 2. Synchronous time series of sea level fluctuations in 2012.

The devices are installed near village of Okhotsk and cape Svobodni.

Анализ данных наблюдений

Полученные ряды наблюдений были подвергнуты спектральному и спектрально-временному анализу. Рассчитанные текущие спектры колебаний уровня моря для временных рядов колебаний уровня вблизи с. Охотское и м. Свободный приведены на рис. 3. Спектры имеют общий характер, наблюдается максимум энергии в диапазоне ветровых волн и зыби, который соответствует приходу штормов.

Обращает на себя внимание факт предвещающего шторм прихода в точку наблюдения длинноволновой зыби с периодом около 20–22 с. Такая длинноволновая зыбь обычно формируется при пробегах волны в тысячи километров, т. е. она пришла издалека, от удаленного шторма. О таком поведении волн зыби известно [11, 12] и предварительно обсуждалось авторами в [1]. Тем не менее представляет интерес детальный анализ этого явления с привлечением синоптических карт с траекториями прохождения циклонов для района Сахалинского побережья Охотского моря.

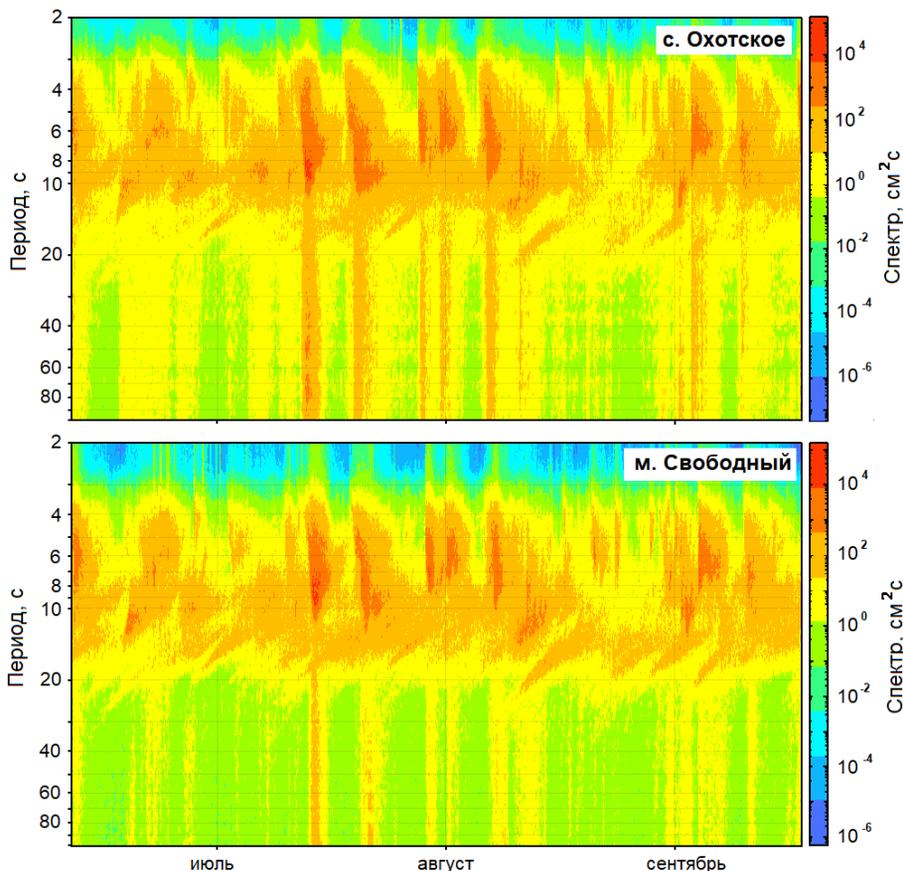


Рис. 3. Спектры колебаний уровня моря для рядов наблюдений вблизи с. Охотское и м. Свободный.

Fig. 3. Spectra of sea level fluctuations for the series of observations near village of Okhotsk and cape Svobodni.

Заметим, что предварительный приход волн зыби, как показали наши исследования, наблюдается и в других пунктах побережья, где также устанавливались регистраторы волнения – в районе юго-восточного и юго-западного побережий о. Сахалин. Наиболее выражен предварительный приход зыби в пунктах наблюдения: с. Яблочное, с. Ильинское, г. Холмск (прибор установлен снаружи бухты), п. Шахтерск, с. Взморье, с. Охотское и вблизи пересыпи оз. Изменчивое.

В других пунктах, особенно в портовых бухтах, спектр искажается вследствие резонансных и фильтрующих свойств портовых бухт. Для анализа были выбраны записи волнения, полученные в районе с. Охотское, где менее изрезанная береговая линия и достаточно гладкая батиметрия, что позволяет уменьшить влияние неровностей дна и берегового рельефа.

В [1, 11, 12] показано, что ранний приход длинных волн зыби связан с разной групповой скоростью волн, которая определяет перенос энергии по выражению, приведенному в [13, 15]:

$$c_{гр} = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \approx \frac{c}{2}, \quad (1)$$

где c – фазовая скорость волны, λ – длина волны.

Фазовая скорость определяется как

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \operatorname{th}\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right)}, \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, H – глубина моря; th – функция гиперболического тангенса.

Фазовая скорость волн также зависит от длины волны, т. е. существует дисперсия волн. Это означает, что волны с разными длинами будут распространяться с разными скоростями: чем больше длина волны, тем больше ее скорость. Поэтому от удаленного шторма в первую очередь приходят наиболее длинные волны (в виде регулярной зыби), а потом все более короткие.

Для оценки скорости распространения и времени добегания волн от различных штормов из записей были выбраны четыре отрезка – временных ряда: 28 июня – 4 июля, 23–27 июля, 10–18 августа и 28 августа – 1 сентября. Каждый из них заканчивался приходом шторма в точку наблюдения и начинался с опережающего (предварительного прихода) зыби. Такую оценку можно выполнить, воспользовавшись спектрами, рассчитанными последовательно по суточным интервалам. Образец таких спектров приведен на рис. 4.

Энергетические спектры волнения, показанные на рис. 4, рассчитаны по суточным интервалам для лучшей читаемости рисунка. Аналогичные спектры для рядов наблюдений вблизи с. Охотское и перед другими штормами имеют схожий характер. Видно, что они содержат по два значимых максимума. Для спектра 24 июля первый пик соответствует 16,8 с, второй 11,9 с. Пики в спектрах 28 июля располагаются на периодах 13,3 с и 9,1 с. Также хорошо видно, что периоды волновых процессов, соответствующих максимумам в спектрах, уменьшаются в течение суток.

Второй максимум в спектрах на более коротких периодах обусловлен зыбью предыдущего шторма. На это указывает и величина периодов зыби, характерная для развитого шторма в районе наблюдений. В [11] полагают, что второй максимум соответствует другому удаленному циклону; возможно, авторы имеют ввиду удаляющийся шторм, т. е. ситуацию, схожую с рассматриваемой.

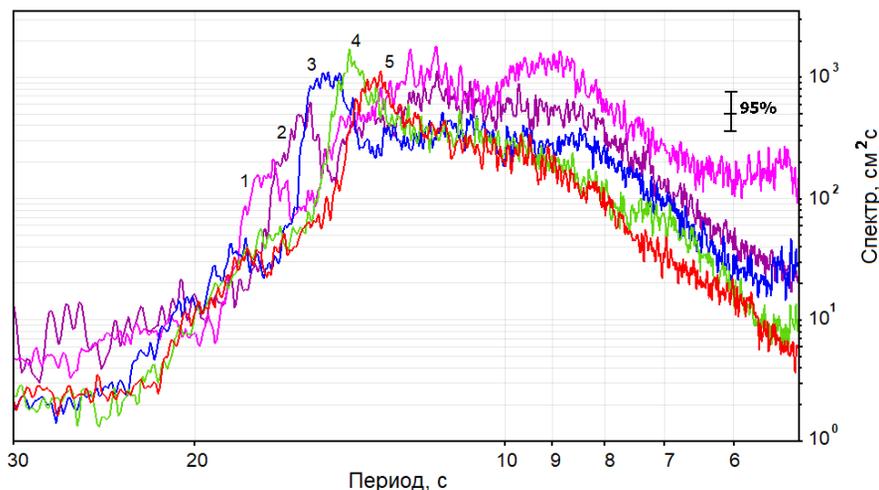


Рис. 4. Спектры волнения с 24 по 28 июля, вычисленные по суточным отрезкам записей прибора, установленного в районе м. Свободный: 1 – 24 июля; 2 – 25 июля; 3 – 26 июля; 4 – 27 июля; 5 – 28 июля.

Fig. 4. The wave spectra from 24 to 28 July, calculated from the daily intervals of the device records near cape Svobodni: 1 – 24 July; 2 – 25 July; 3 – 26 July; 4 – 27 July; 5 – 28 July.

Была проведена оценка скорости изменения периодов волн с течением времени для каждого из четырех рассматриваемых временных интервалов. Для этого вычислялись средние периоды волн зыби за сутки и определялась разность со следующими сутками, т. е. находилась величина $\Delta T/\Delta t$, где ΔT – суточное изменение периода волн зыби, Δt – время (сутки). Также для дискретных значений величины ΔT (изменений периода волн за сутки) были вычислены математическое ожидание и дисперсия D с использованием выражения:

$$D[\Delta T] = \sum_{i=1}^n p_i (\Delta T_i - M[\Delta T])^2, \quad (3)$$

где ΔT_i – i -е значение случайной величины; p_i – вероятность того, что случайная величина принимает значение ΔT_i с учетом равномерного распределения вероятностей; n – количество значений случайной величины; M – математическое ожидание. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Из рис. 5 также видно, что период волн уменьшается со временем нелинейно, о чем можно судить по виду математического ожидания (кривая 3), его степенной аппроксимации, которая записывается выражением

$$\Delta T = 2,4406 t^{-0,674}. \quad (4)$$

Дисперсия дискретных значений ΔT , которая является мерой разброса значений случайной величины относительно ее математического

ожидания, небольшая и начиная со вторых суток не превышает $0,05 \text{ с}^2$. Отметим, что авторы [11] полагают, что изменение периода должно быть близко к линейному.

Также был проведен анализ синоптических карт и прихода циклонов к району наблюдения с целью выяснения времени подхода зыби. Для одного из рассматриваемых случаев на рис. 6 приведена синоптическая карта на 25.07.2012 г. и показана траектория циклона.

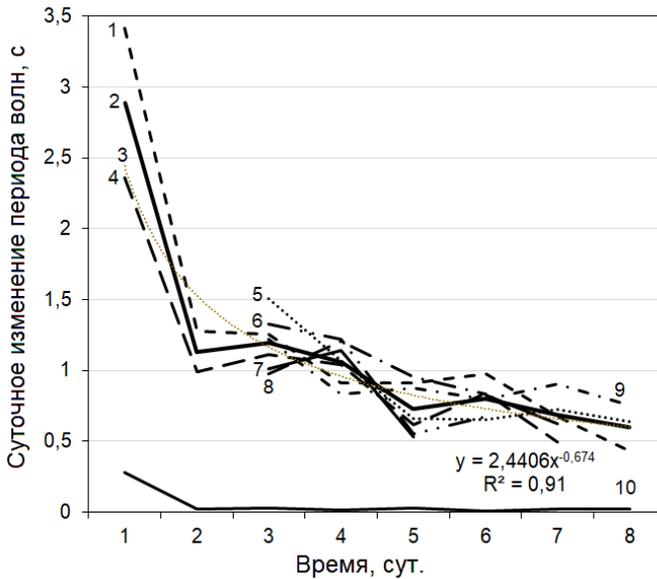


Рис. 5. Суточное изменение периода волн для рассмотренных интервалов у м. Свободный: 1 – с 10 августа, 5 – с 28 июня, 7 – с 28 августа; у с. Охотское: 4 – с 10 августа, 6 – с 23 июля, 8 – с 28 августа, 9 – с 28 июня; 2 – математическое ожидание M ; 10 – дисперсия; 3 – степенная аппроксимация математического ожидания с выражением на поле рисунка; R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Fig. 5. Daily change of the wave period for the considered intervals near cape Svobodni: 1 – from August 10, 5 – from June 28, 7 – from August 28; from village of Okhotsk: 4 – from August 10, 6 – from July 23, 8 – from August 28, 9 – from June 28; 2 – mathematical expectation M ; 10 – dispersion; 3 – power approximation of mathematical expectation with expression on the figure field; R^2 – the value of approximation reliability.

Как следует из анализа приведенной синоптической карты, циклон по мере продвижения на восток и связанное с ним поле ветров формировало на поверхности Японского моря ветровые волны различной длины, распространяющиеся под различными углами к направлению ветра. Механизм генерации волн подробно изложен в [4] и других работах. Каждая возникшая составляющая спектра волн с определенной длиной и скоростью, покидая зону шторма, распространяется в форме волн зыби [5, 7–10]. Волны больших периодов и, соответственно, большей длины

распространяются быстрее и достигают удаленного берега раньше коротких волн, вызванных тем же ветром. Таким образом, форма спектра изменяется непрерывно и сужается. При этом энергия волн переносится с соответствующей групповой скоростью [4]. Образовавшиеся таким образом в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн в Японском море волны зыби приходят в район расположения измерителя волнения.

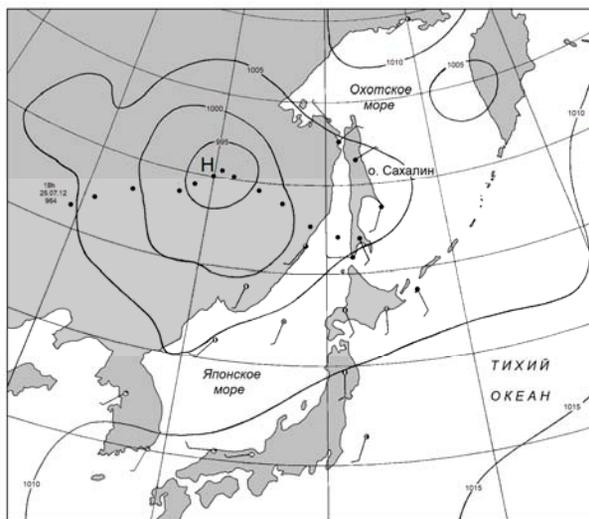


Рис. 6. Синоптическая карта на 27.07.2012 за 00.00 UTC по данным Гидрометеоцентра Сахалинского УГМС. Положения центра циклона указаны через 6 ч.

Fig. 6. Synoptic map on 27.07.2012 for 00.00 UTC according Sakhalin UGMS Hydrometeocentre. The position of the cyclone center is indicated every 6 h.

Анализ траекторий циклонов, выполненный с использованием архивных синоптических карт Сахалинского УГМС, а также данных, приведенных в [2, 3], показал, что в рассматриваемый период года на акваторию Охотского моря оказывают влияние циклоны, зарождающиеся над территорией Азиатского континента и Восточной Сибири, либо приходящие в этот район с юга Японского моря. Рассмотренный здесь ранний приход зыби с 23 по 27 июля вызван циклоном одного из этих типов.

Другой циклон, траектория которого учитывалась при проведении описанных исследований, с опережающим волнением с 28 августа по 2 сентября, пересек территорию Восточно-Китайского моря, сместился к Желтому морю, затем вышел в направлении Китая, и далее его траектория проходила над континентом параллельно береговой линии с выходом на север о. Сахалин. При этом связанное с ним поле ветров из района Желтого моря сместилось в северную часть Японского моря, что показывают спутниковые карты NASA (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), приведенные на рис. 7.

Воздействие ветрового поля, смещающегося в северо-восточном направлении, на поверхность Японского моря, формировало поле ветровых волн, обусловленное ростом энергии ветра вследствие подхода циклона и согласно механизмам, описанным в [4]. Ветровые волны, выходя из зоны действия сильных ветров, трансформируются в зыбь (мертвую зыбь) [12], и она, распространяясь, достигает пункта регистрации волнения, опережая приход шторма.

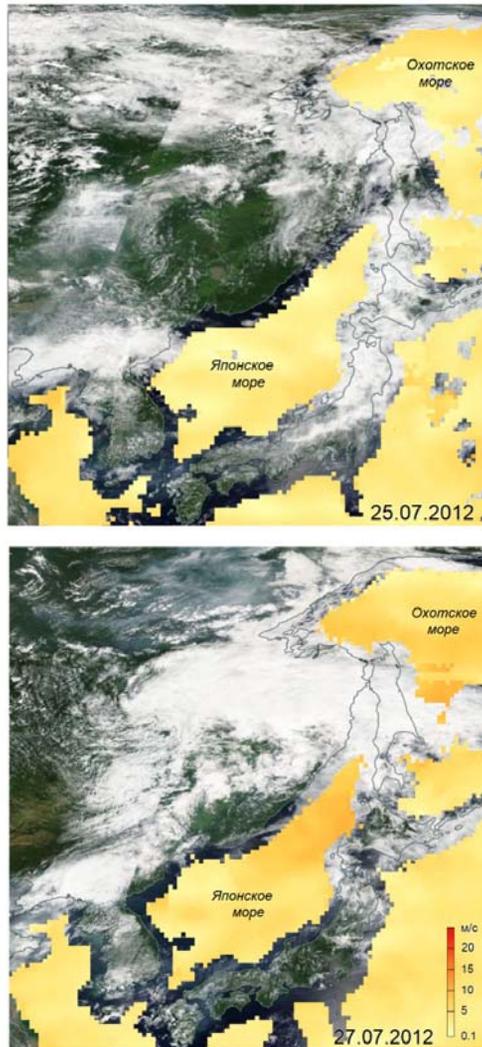


Рис. 7. Карты скоростей поверхностного ветра над океаном, приведенные на сайте NASA (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) для 25 и 27 июня 2012 г.
Fig. 7. Maps of surface wind speeds over the ocean, given on the NASA website (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) for 25 and 27 June 2012.

Следует также отметить, что перемещение одного из рассмотренных в анализе циклонов, зыбь от которого была зарегистрирована с 10 по 18 августа, осуществлялось восточнее от рассмотренных выше траекторий – над Тихим океаном в северном направлении с восточной стороны Японских островов. В отличие от других рассмотренных случаев, волнение от него пришло ранее, чем за семь суток, в то время как для приходящих с континента или Японского моря циклонов волнение опережает приход шторма примерно на трое суток. Это хорошо видно на рис. 5. Данная ситуация представляет отдельный интерес и будет рассмотрена в другой статье с учетом измеренных нами скоростей ветра.

Распространение зыби от источника генерации – циклона рассматривают подобно лучам в оптике [4]. В нашем случае центр циклона на момент прихода зыби к прибору располагался над Азиатским континентом, и циклон перемещался над ним, поэтому прямой луч распространения зыби от циклона к месту наблюдения на о. Сахалин отсутствует. В данном случае, как и в аналогичных других, центр циклона перемещается над Азиатским континентом, но связанное с ним поле ветров формирует в Японском море ветровое волнение, которое, покинув зону шторма, трансформировалось в зыбь. Для таких событий видимая апертура определяется конфигурацией Японского моря, а не размером шторма. К аналогичным выводам в похожей ситуации приходят и в [12]. Похожим образом ведут себя и циклоны, приближающиеся к Японскому морю с юго-западных направлений, в результате зыбь, распространяясь по Японскому морю, достигает о. Сахалин.

Обсуждение результатов

При продвижении циклона над Азиатским континентом и по мере его приближения к побережью в Японском море наблюдается генерация ветрового волнения, которое за пределами шторма в результате нелинейного взаимодействия трансформируется в зыбь, распространяющуюся в северном направлении и достигающую южной оконечности о. Сахалин.

При больших расстояниях от циклона и вызванного им шторма энергия генерируемой волны концентрируется в узком диапазоне частоты и направления (энергия занимает узкую область на пространстве волновых чисел). Прибрежные мелководья могут при благоприятных обстоятельствах выступать в качестве эффективных линз для этого почти монохроматического излучения и вызывать необычную фокусировку энергии. Видимо еще и поэтому волны зыби распространяются на большие расстояния с групповой скоростью, зависящей от периода волны. И ее заблаговременное появление в пункте наблюдения говорит о приближении циклона и возможном сильном шторме.

В этом случае представляет интерес не расстояние до центра циклона, который к тому же перемещается не по нормали к берегу и не прямым

путем, а время до начала шторма. При этом имеется возможность для подготовки к шторму и отвода судов, особенно маломерных, в безопасных местах. Можно оценить время до прихода шторма по измеренным за некоторый промежуток времени периодам приходящей зыби, затем вычислить суточную скорость изменения периода и по рис. 5 определить, через какое время подойдет циклон.

Поскольку нами использовались в данной работе только два пункта наблюдения, достоверно заявить, что скорость изменения периода в разных местах побережья одинакова, нельзя. Здесь сделаны выводы для конкретного района побережья о. Сахалин, другие районы будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

По рядам наблюдений рассчитаны погрешности в определении времени прихода шторма по известным периоду, скорости изменения периода и аппроксимирующей математическое ожидание функцией для восьми случаев. При этом средняя погрешность составила 15,5 %. Как видно, это небольшая величина, поскольку в случае появления зыби через самый короткий срок, из наблюдаемых штормов, погрешность составляет 14,4 ч и в запасе для принятия мер остается достаточно времени – 81,6 ч. Таким образом данный предвестник, наряду с другими, может использоваться для прогнозирования времени начала шторма.

Также можно оценить время подхода шторма по известной групповой скорости и периоду колебаний (частоте волн), используя приведенную в [11] формулу для длиннопериодной зыби:

$$t - t_0 = \frac{x}{c_{гp0}} \left(1 + \frac{4\pi^2 h}{g} f^2 \right), \quad (5)$$

где t_0 , t – время выхода волны из источника и прихода в точку наблюдения соответственно; x – расстояние от источника до записывающего устройства; $c_{гp0} = \sqrt{gh}$ – асимптотическое значение групповой скорости; h – глубина; g – ускорение силы тяжести; f – частота волны. Для короткопериодной зыби имеется более простая формула. Но авторы настоящей статьи считают этот путь более сложным, поскольку нужно оценивать несколько параметров, таких как длина волн зыби, глубина по трассе распространения волн, при этом, как показали наши вычисления, точность определения обоими методами примерно одинаковая.

При определении времени добега волн до пункта наблюдения необходимо учитывать нелинейные эффекты на мелководье. Так, согласно [14] фазовая скорость волн зыби, а значит и групповая, увеличивается на мелководье за счет нелинейных эффектов до 25 % на периодах около 15 с. Однако локальная фазовая скорость внутри группы волн показывает пространственное изменение, которое больше на фронте волновой группы и постепенно уменьшается к концу группы. Фазовая скорость внутри группы обычно медленнее, чем линейная дисперсионная зависимость.

Потому вносимая на этом периоде ошибка за счет нелинейных эффектов мелководья не оказывает существенного влияния на результат, учитывая еще и то обстоятельство, что мелководная зона по сравнению с длиной пробега волн составляет единицы процентов.

Авторы также отмечают, что для определения раннего прихода зыби по методам, изложенным, например, в [4], используются несколько параметров: высота волн в области шторма, расстояние от границы шторма до расчетной точки. Получение этих параметров представляет определенные сложности для отдаленных рыболовецких предприятий, например расположенных за Санайским хребтом, которые далеко не всегда имеют устойчивую связь и возможность оперативно получать информацию. Поэтому предлагаемый в настоящей статье принцип определения времени прихода шторма в точку наблюдения свободен от некоторых недостатков вышеприведенного метода, поскольку использует один параметр волнения – период, измеренный непосредственно в точке наблюдения.

Выводы

Проведен анализ временных рядов волнения для двух пунктов наблюдения на расстоянии 16,5 км вблизи юго-восточного побережья о. Сахалин. На спектрах обоих рядов наблюдается пик энергии в диапазоне волн зыби, предшествующих шторму. Периоды этих волн значительно уменьшаются со временем. Так, для регистратора волнения, установленного вблизи с. Охотское, зарегистрированные периоды волн зыби с 10 по 18 августа изменились с 23,7 до 14,01 с.

Выполнена оценка скорости изменения периода волн во времени для четырех рассматриваемых временных интервалов. Установлено, что период волн уменьшается со временем нелинейно, о чем можно судить по виду математического ожидания (кривая 3, рис. 5), его степенной аппроксимации, которая определяется выражением (4). При этом дисперсия значений ΔT небольшая и начиная со вторых суток не превышает $0,05 \text{ с}^2$.

Анализ синоптических карт для района наблюдения показал, что циклоны смещаются с территории Азиатского континента и Восточной Сибири либо с юга Японского моря и Китая. В этих случаях центр циклонов на момент прихода зыби к измерителю волнения на о. Сахалин располагается над Азиатским континентом.

Перемещение центра циклона над Азиатским континентом и связанное с ним поле ветров формирует ветровое волнение в Японском море, которое за пределами шторма трансформируется в зыбь в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн. При этом видимая апертура для длинных волн зыби определяется конфигурацией Японского моря, а не размером шторма [12].

Выполненные в работе расчеты скорости изменения периода волн зыби предоставляют возможность оценить время прихода шторма к месту наблюдения, используя два измерения периодов зыби через

произвольный интервал времени, по которым вычисляется суточная скорость изменения периода. Затем для нее по рис. 5 определяется, через какое время подойдет шторм.

Предложенный принцип определения времени прихода шторма может быть использован в любой точке побережья. Однако поскольку изменения периодов волнения, анализируемые в настоящей работе, выполнялись только в двух пунктах и не известно, одинаковые ли скорости изменения периода в разных местах побережья, полученные результаты применимы только для конкретного района побережья о. Сахалин. Отметим также, что предлагаемый принцип определения времени прихода шторма в точку наблюдения проще известных, поскольку использует один параметр волнения, измеренный непосредственно в точке наблюдения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Список литературы

1. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Кириллов К.В. Предвестники шторма // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 323-329.
2. Лоция Охотского моря. Книга 1406. Вып. 1. Управление навигации и океанографии Министерства обороны РФ, 2011.
3. Лоция северо-западного берега Японского моря. Книга 1401. Управление навигации и океанографии Министерства обороны РФ, 1996.
4. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2013. 337 с.
5. Рожков В.А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л.: Гидрометеониздат, 1973. 280 с.
6. Barber N.F., Ursell F. The generation and propagation of ocean waves and swell. I. Wave periods and velocities // Philos. Trans. Royal Soc. London. A: Math. Phys. Sciences. 1948. Vol. 240, no. 824. P. 527-560
7. Krogstad H.E. Estimating the maximum wave height from the significant wave height. IKU, 1978. 201 p.
8. Longuet-Higgins M.S. On the Joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves // J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80, no 18. P. 2668-2694.
9. Longuet-Higgins M.S. On the distribution of the height of the sea waves: same effects on nonlinearity and finite band width // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85, no. C3. P. 1519-1522.
10. Longuet-Higgins M.S. On the statistical distribution of the heights of the sea waves // J. Mar. Res. 1952. Vol. 11. P. 245-260.
11. Munk W.H., Miller G.R., Snodgrass F. E., Barber N.F. Directional recording of swell from distant storms // Phil Trans. Roy. Soc., London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1963. Vol. 255, no. 1062. P. 505-584.
12. Snodgrass F.E., Groves G.W., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H., Powers W.H. Propagation of ocean swell across the Pacific // Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1966. Vol. 259 (1103). P. 431-497.
13. Wadhams P. Attenuation of swell by sea ice // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78(18). P. 3552-3563.
14. Wang D.W., Kaihatu J.M., Hwang P.A. On the analysis of dispersion relation of spatially shoaling waves. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Oceanography Division, 2004. 8 p.

15. Wright J., Colling A., Park D. Open University. Waves, Tides and Shallow Water Processes, second edition // Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999, 227 p.

References

1. Kovalev P. D., Kovalev D. P., Kirillov K. V. The precursors of a storm. *Geosistemy perekhodnyh zon [Geosystems of Transition Zones]*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 323-329. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.332-338. [in Russ.].
2. Lotsiya Ohotskogo morya. Kniga 1406. Vyp. 1. Upravlenie navigatsii i okeanografii Ministerstva oborony RF, 2011. [in Russ.].
3. Lotsiya severo-zapadnogo berega Yaponskogo morya. Kniga 1401. Upravlenie navigatsii i okeanografii Ministerstva oborony RF, 1996. [in Russ.].
4. Rezhim, diaгноз i prognoz vetrovogo volneniya v moryah i okeanah. Moscow, Obninsk, IG SOTSIN publ., 2013, 337 p. [in Russ.].
5. Rozhkov V.A. Metody veroyatnostnogo analiza okeanologicheskikh protsessov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1973, 280 p. [in Russ.].
6. Barber N.F., Ursell F. The generation and propagation of ocean waves and swell. I. Wave periods and velocities. *Philos. Trans. Royal Soc. London. A: Math. Phys. Sciences*, 1948, vol. 240, no. 824, pp. 527-560.
7. Krogstad H.E. Estimating the maximum wave height from the significant wave height. *IKU*, 1978, 201 p.
8. Longuet-Higgins M.S. On the Joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves. *J. Geophys. Res.*, 1975, vol. 80, no 18, pp. 2668-2694.
9. Longuet-Higgins M.S. On the distribution of the height of the sea waves: same effects on nonlinearity and finite band width. *J. Geophys. Res.* 1980, vol. 85, no. C3, pp. 1519-1522.
10. Longuet-Higgins M.S. On the statistical distribution of the heights of the sea waves. *J. Mar. Res.*, 1952, vol. 11, pp. 245-260.
11. Munk W.H., Miller G.R., Snodgrass F. E., Barber N.F. Directional recording of swell from distant storms // *Phil Trans. Roy. Soc., London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1963, vol. 255, no. 1062, pp. 505-584.
12. Snodgrass F.E., Groves G.W., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H., Powers W.H. Propagation of ocean swell across the Pacific. *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, 1966, vol. 259(1103), pp. 431– 497.
13. Wadhams P. Attenuation of swell by sea ice. *J. Geophys. Res.*, 1973, vol. 78(18), pp. 3552-3563.
14. Wang D.W., Kaihatu J.M., Hwang P.A. On the analysis of dispersion relation of spatially shoaling waves. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Oceanography Division, 2004. 8 p.
15. Wright J., Colling A., Park D. Open University. Waves, Tides and Shallow Water Processes, second edition. *Butterworth-Heinemann*, Oxford, 1999, 227 p.

Поступила в редакцию 18.04.2019 г.

Received by the editor 18.04.2019.