

Предвестники шторма

© П. Д. Ковалев*, Д. П. Ковалев, К. В. Кириллов

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

**E-mail: kovalev_pd@hotmail.com*

Проведено систематическое исследование штормового волнения на юго-западном и юго-восточном побережьях о. Сахалин. Установлено, что приходу шторма предшествует приход в точку наблюдения более длинных волн зыби, периоды которых уменьшаются к приходу шторма и на его начало составляют около 7 с. Натурные эксперименты показали также, что ранний приход волн зыби не зависит от направления ветра в точке наблюдения. Дано объяснение наблюдаемого эффекта с использованием модели, учитывающей дисперсионные свойства волн зыби. Результаты численного моделирования показывают, что групповая скорость распространения волн зыби является важным параметром, который может быть использован в качестве предвестников шторма. Зная скорости распространения волн и разность времен прихода, можно определить, на каком расстоянии находился источник шторма на момент прихода длинноволновой зыби. Кроме того, можно оценить минимальное время прихода шторма по времени первого прихода длинноволновой зыби и скорости волн для характерного периода волн на начало шторма 7–10 с.

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

The precursors of a storm

Peter D. Kovalev, Dmitry P. Kovalev, Konstantin V. Kirillov*

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

**E-mail: kovalev_pd@hotmail.com*

A systematic study of storm surges on the South-Western and South-Eastern coasts of Sakhalin Island was carried out. It is established that the coming storm precedes the arrival to the observation point of the longer swell waves whose periods are reduced for the coming storm and they is about 7 s. Field experiments have also shown that early arrival of swell does not depend on the wind direction at the point of observation. The observed effect is explained using a model that takes into account the dispersion properties of swell. The results of numerical simulations show that the group velocity of the swell propagation is an important parameter that can be used for forecasting of storm. And if the velocity of waves propagation and the time difference of their arrival are known, then it is possible to determine at what distance was the storm at the time of the long-wavelength swell arrival. In addition, it is possible to estimate the minimum time of the storm arrival by the time of the first arrival of the long-wave swell and the wave velocity for the characteristic wave period at the beginning of the storm 7–10 s.

Keywords: swell, wave dispersion properties, group velocity.

Введение

Дальневосточные моря отличаются высокой штормовой активностью, обусловленной прохождением здесь тихоокеанских циклонов. Значительные размеры Охотского моря, частые и сильные ветры над ним обуславливают развитие крупных волн, достигающих порой 10–11 м. При шторме всегда генерируется целый набор волн разной дли-

ны. Самые длинные из них перемещаются наиболее быстро и достигают наблюдателя первыми. Н. Барбер и Ф. Урселл [Barber, Ursell, 1948] пришли к заключению, что распространение зыби является линейным процессом, так что волны различных длин и периодов ведут себя независимо друг от друга. Вследствие этого волны зыби, пришедшие от удаленных штормов, могут существовать

вместе с волнами, порожденными в данном месте. Чем ниже частота зыби, тем медленнее она затухает при распространении. Анализируя данные волнения, полученные на побережье Марокко, Барбер и Урселл обнаружили признаки зыби, порожденной штормом у мыса Горн на расстоянии 10 000 км [Barber, Ursell, 1948].

Зыбью называется волнение, которое существует за счет накопленной энергии волны, когда передача энергии ветра к волнам прекращается. В океанах и морях встречаются разные случаи формирования зыби, например непосредственно в зоне шторма при некоторых колебаниях в скорости дующего ветра. Так как среди совокупности ветровых волн наблюдаются волны в различной стадии развития, то достаточно скорости ветра немного уменьшиться, чтобы скорость некоторого числа волн превысила скорость ветра и они превратились бы в зыбь. При новом усилении ветра некоторые из них могут опять перейти в ветровые волны, однако в общем случае с увеличением скорости и продолжительности действия ветра все большее число волн начинает переходить в зыбь. Также, если в данном районе перемещается циклон со значительной скоростью ветра, волны при этом, выходя из области шторма, превращаются в зыбь. Зыбь, существующая при полном отсутствии ветра, называется мертвой зыбью. Она характерна двухмерными однородными по элементам волнами с малой крутизной. В результате взаимодействия ветровых волн и зыби в океане возникает смешанное волнение, которое в простейшем случае состоит из этих двух систем волн [Абузьяров, 1981].

По мере распространения волн из района шторма их характеристики меняются. Прежде всего уменьшается разброс направлений их распространения. Разброс связан с углом, под которым район шторма виден из точки наблюдения, а этот угол уменьшается с возрастанием расстояния до точки. Плотность энергии волн уменьшается за счет геометрического расхождения волн по мере удаления от источника. Для волн, генерируемых точечным источником, энер-

гия на единицу длины волнового фронта обратно пропорциональна пройденному расстоянию независимо от длины волны. Диссипативные процессы, из которых наиболее важным, вероятно, является разрушение волн (хотя некоторую роль могут играть также сопротивление воздуха и турбулентное трение), влияют на короткие волны сильнее, чем на длинные. Поэтому форма спектра волнения изменяется, и пик смещается в сторону низких частот. Вследствие этих изменений зыбь от далекого шторма характеризуется волнами большего периода, относительно малой крутизны и длинными гребнями [Боуден, 1988].

Лаборатория волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН проводит изучение волновых процессов в прибрежной зоне моря и использует для измерения волнения автономные регистраторы волнения АРВ-14, осуществляющие запись колебаний придонного давления с секундной дискретностью. В последующем давление с использованием известной методики пересчитывается в высоты волн. Наблюдения за волнением выполняются в южной части о. Сахалин и южных Курильских островов с 2002 г. по настоящее время. Регистрация волновых процессов осуществляется в широком диапазоне периодов, начиная от самых коротких – ветровых волн до приливных. Этот диапазон включает все морские явления, которые при определенных условиях могут представлять серьезную опасность для транспорта, прибрежных инженерных сооружений и населения. Известно, что сильное штормовое волнение – ветровые волны, зыбь и возможный штормовой нагон – ответственно за разрушение берегов, их затопление, возникновение явления тягуна, выброс судов на отмели. Своевременное предупреждение позволяет вывести суда из бухты в открытое море на безопасное расстояние. Поэтому важно вовремя обнаружить предвестники этих опасных морских явлений.

Авторы провели исследование возможных предвестников штормового волнения и зыби, установленных по данным инструментальных наблюдений.

Эксперимент

Для проведения исследований использовались данные по волнению, полученные в разных точках прибрежной зоны юго-восточного и западного побережий о. Сахалин в течение 2007–2017 гг. Как оказалось, в рамках рассматриваемой в настоящей работе проблемы они имеют схожий характер, поэтому в качестве основных здесь использованы записи волнения, полученные вблизи с. Взморье, расположенного на юго-восточном побережье о. Сахалин на расстоянии около 110 км от областного центра. На рис. 1 приведена карта региона и показано место расположения станции измерения волнения. На рис. 2 приведен типичный временной ряд лето–осень 2007 г. За время наблюдений зарегистрировано несколько штормов в периоды со 2.09 по 5.09, с 7.09 по 12.09, с 24.09 по 30.09 и с 5.10 по 12.10.2007 г.

На графике временного хода волнения и рассчитанном текущем спектре моменты повышения энергии колебаний хорошо выделяются. Обращает на себя внимание факт

прихода в точку наблюдения 23.08 длинноволновой зыби с периодом около 22 с. Такая длинноволновая зыбь обычно формируется при пробегах волны в тысячи километров, т.е. она пришла издалека, от удаленного шторма, прошедшего в стороне.

Наклонная полоса, соответствующая подъему энергии зыби с началом 28.08 в 22:36 и периодами волн около 11.5 с, расположенная выше предыдущей, показывает уменьшение периода волн зыби со временем и к началу шторма 2.09 в 15:50 период составляет около 7 с. Аналогичная ситуация и с приходом зыби с периодами около 12.6 с в точку наблюдения 3.09 в 11:39 от последующего затем шторма 7.09 в 14:43. Причем подъем ее энергии хорошо виден даже на фоне предыдущего шторма. И к началу шторма 7.09 периоды зыби также уменьшаются до примерно 7 с.

Похожая на выше описанную картина наблюдается и перед штормом 24.09 в 20:35, когда зыбь с периодами около 14.4 с приходит в точку наблюдения 22.09 в 21:13. В то же время для этой ситуации приход зыби предвещает шторм примерно на 34 ч.

Подобная картина предварительного прихода волн зыби, как показали наши исследования, наблюдается и в других пунктах побережья, где нами устанавливались регистраторы волнения. Кроме с. Взморье, наиболее выражен предварительный приход зыби в пунктах наблюдения в с. Яблочное, с. Ильинское, г. Холмск (прибор установлен снаружи бухты), пос. Шахтерск, с. Охотское и вблизи пересыпи оз. Изменчивое. В других пунктах, особенно в портовых бухтах, спектр искажается вследствие резонансных и фильтрующих свойств портовых бухт.

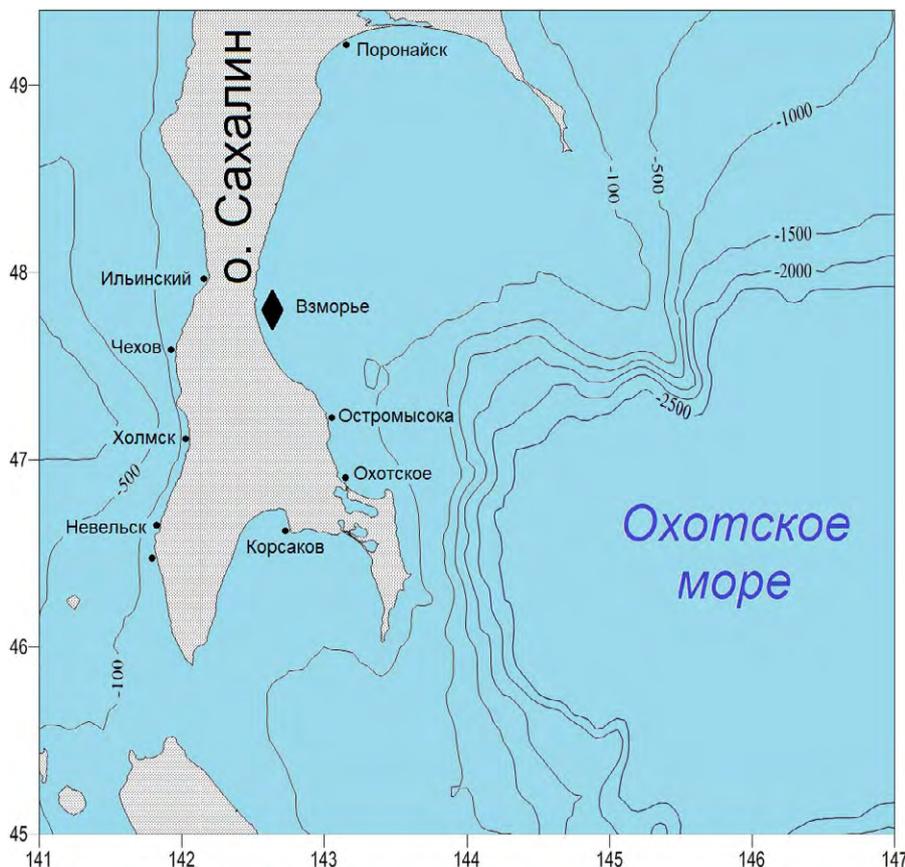


Рис. 1. Карта района проведения наблюдений и положение станций измерения волнения.

Был рассмотрен вопрос зависимости такого предвестника шторма от направления ветра, а значит, и направления подхода волн зыби к побережью. К сожалению, в с. Взморье отсутствует пункт метеонаблюдений, и данные по ветру были взяты на метеосайте (<http://www.rp5.ru>) для г. Макаров, расположенного на том же побережье о. Сахалин, что и с. Взморье. По ним были построены векторы скорости ветра, приведенные на рис. 2.

Сравнение направлений вектора скорости ветра с моментами предваряющего прихода волн зыби показало, что более длинноволновая и ранее приходящая зыбь соответствует юго-западным ветрам на момент прихода зыби в точку наблюдения. Очень хорошо это видно с 28.08, когда ветра этих румбов дули в течение почти 2 сут. Тем не менее предваряющий шторм приход зыби наблюдается и для ветров других румбов, как, например, 5.09–8.09. Хотя ветра юго-западного направления присутствуют и здесь. Из этого анализа можно заключить, что предваряющая шторм зыбь приходит при любых направлениях ветра, предшествующих шторму.

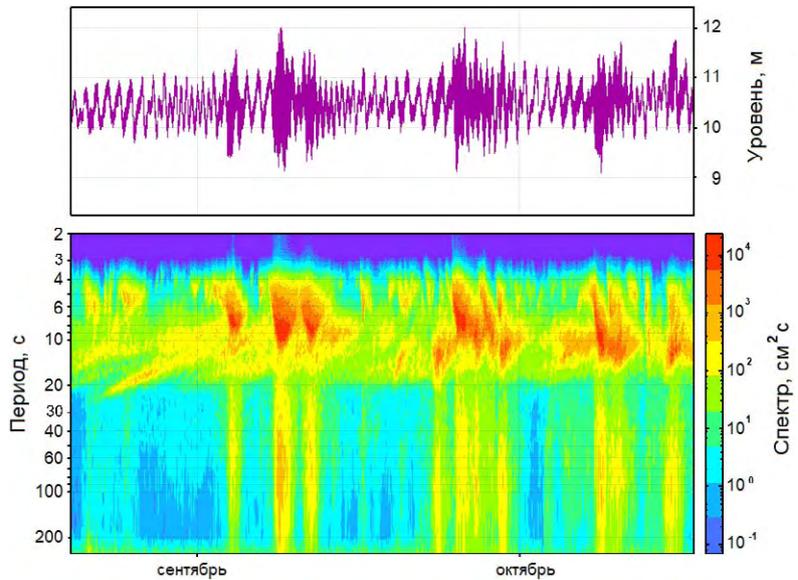


Рис. 2. Временной ряд колебаний уровня моря в районе с. Взморье в 2007 г., станция № 05, и его текущий спектр.

Модель

Объяснение наблюдаемой картины предшествующего шторму прихода волн зыби можно дать следующее. Плоскую волну, распространяющуюся по поверхности океана, можно представить в виде [Рабинович, 1993]:

$$\zeta(x, y; t) = \zeta_0 e^{-i(\omega t - ky - px)}, \quad (1)$$

где x, y – декартовы координаты, t – время, ζ_0 – амплитуда волны, $\{p, k\}$ – составляющие волнового вектора. Длина волны определяется выражением

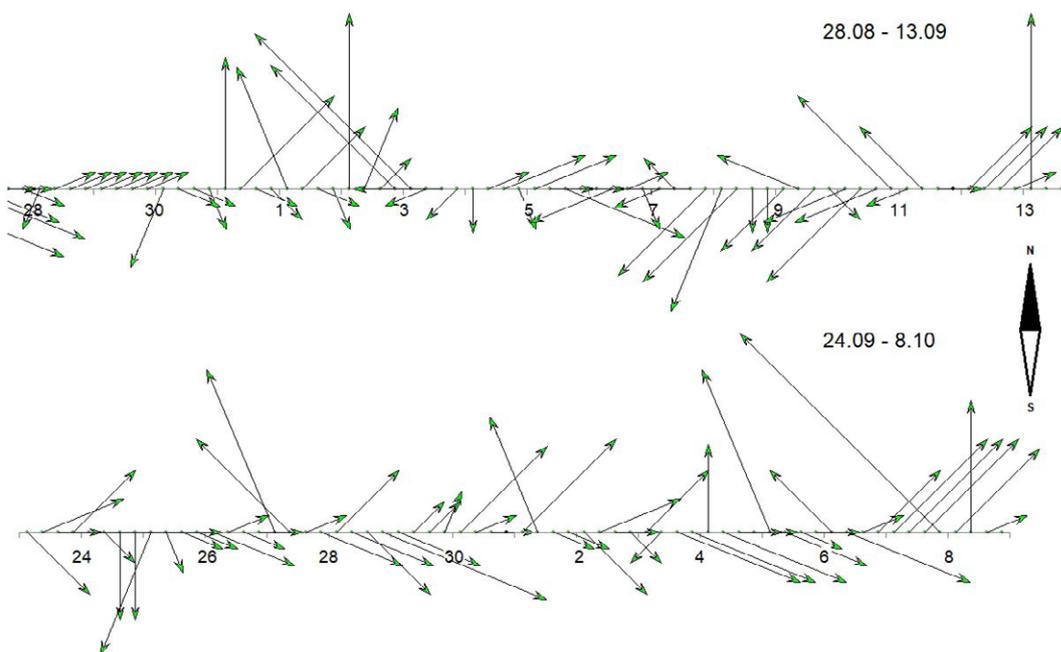


Рис. 3. Векторы скорости ветра для г. Макаров. По оси x – числа месяца.

$$\lambda = 2\pi/K, \quad (2)$$

где $K = (k^2 + p^2)^{1/2}$ – модуль волнового вектора, а фазовая скорость для любой глубины воды описывается как [Wang et al., 1999]

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}, \quad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести, h – глубина воды.

Из выражения (3) следует, что фазовая скорость волн зависит от их длины, т.е. существует дисперсия волн. Это означает, что волны с разными длинами будут распространяться с разными скоростями и 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. По известной фазовой скорости волны можно определить и групповую скорость, которая определяет перенос энергии, по выражению, приведенному в [Wadhams, 1973; Wang et al., 1999]:

$$c_{гр} = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \approx c/2. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что для коротких волн на глубокой воде, когда $K^{-1} < h$, фазовая скорость поверхностных волн аппроксимируется как $c = \sqrt{g\lambda/2\pi}$. Но вблизи берега это неравенство для волн зыби с характерными периодами 11–14 с и длинами волн от 150 до 240 м не выполняется. И для совсем малых глубин $h < \lambda/20$ скорость поверхностных волн $c = \sqrt{gh}$. В то же время указанные волны зыби достаточно короткие, по сравнению с приливными, и будут распространяться из открытого океана к берегу как волны на глубокой воде до глубины $h < \lambda/2$, поэтому основной путь волны зыби будут проходить с фазовой и групповой скоростью, характерной для волн глубокого океана [Wang et al., 1999].

С использованием выражений (3, 4) рассчитаны кривые скоростей для волн в глубокой воде (глубина 500 м и более) и для мелкой воды (глубина 30 м), где, как показывает расчет, скорости ограничены (рис. 4). Короткопериодная зыбь, приходящая к началу шторма, по данным натурных наблюдений, имеет

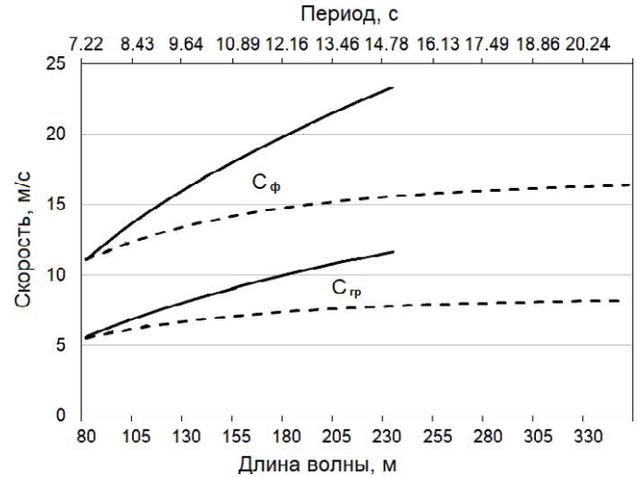


Рис. 4. Зависимость групповой и фазовой скоростей волн от длины волны (периода). Пунктирные линии для мелкой воды, глубина 30 м, сплошные для глубокой, 500 м.

периоды от 7 до 10 с. Влияние мелководья на эти волны менее значимо.

Теперь по известной групповой скорости можно определить расстояние до шторма [Munk et al., 1963]. Обозначим x – расстояние от источника до записывающего устройства, t_0 , t – время выхода волны из источника и прихода в точку наблюдения соответственно. Источником считается точка в пространстве–времени. Это подразумевает, что линейные размеры малы по сравнению с расстояниями между источником и точкой регистрации. Групповая скорость $c_{гр}(T)$ – это скорость, с которой некоторая волна периода T распространяется от источника к приемнику. Тогда расстояние до шторма можно определить из выражения [Munk et al., 1963]:

$$c_{гр}(T) = x / (t - t_0). \quad (5)$$

В (5) еще остаются неизвестные величины t и t_0 или $\Delta t = (t - t_0)$ – время, за которое волна от источника достигнет прибора. Косвенно его можно найти из скорости изменения периода dT/dt , поскольку известно, что период приходящих к началу шторма волн обычно составляет 7–10 с. Для определения расстояния до шторма можно также воспользоваться двумя волнами с разными периодами, поскольку из-за дисперсии они будут иметь разное время прихода, по которому можно рассчитать время распространения более длинной волны.

Обсуждение

Следует отметить, что в работе [Hautala et al., 2005] получены близкие к нашим результаты групповой скорости для волн зыби при распространении их от шторма. Поэтому можно говорить о надежности полученных нами данных и расчетов.

Зная скорости распространения волн и разность времен прихода, можно определить, на каком расстоянии находился источник шторма на момент прихода длинноволновой зыби. Кроме того, можно оценить минимальное время прихода шторма по времени первого прихода длинноволновой зыби и скорости волн для характерного периода волн на начало шторма 7–10 с.

Так, для случая подъема энергии прошедшей зыби 3.09 в 11:39 с периодами около 12.6 с и уменьшением до 7 с периода волн зыби к началу шторма 7.09 в 14:43 разность времен прихода волн разных периодов равна 101.06 ч. В этом случае расстояние до шторма (источника генерации зыби), определенное с учетом скорости распространения коротковолновой зыби с периодом 7 с около 5 м/с, составляет 1828 км. Возможна корректировка расстояния по расположению циклона, генерирующего зыбь, по синоптической карте, и в дальнейшем введение поправки в расчеты. Однако для данного случая авторы такой картой не располагали.

J. Rego и C. Li [Rego, Li, 2009] исследовали образование штормовых нагонов в зависимости от скорости перемещения циклонов. При этом их данные показали, что скорость движения циклона составляет от 2 до 12 м/с, что сравнимо со скоростью распространения коротких волн зыби, и именно поэтому мы наблюдаем в самом начале шторма короткую зыбь с периодами 7 с (скорость около 5 м/с), которая распространяется со скоростью циклона и приходит одновременно с ним. Аналогичные ситуации наблюдаются и в других случаях, как, например, перед штормом, подошедшим 8.09 в 11:45.

При определении времени добегания волн до пункта наблюдения с использованием групповой скорости волн необходимо учитывать нелинейные эффекты на мелководье. Однако,

согласно [Wang et al., 2004; Wright et al., 1999], фазовая скорость волн зыби, а значит, и групповая увеличивается на мелководье за счет нелинейных эффектов до 25 % на периодах около 15 с и уменьшается до единиц процентов на периодах около 7 с. 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.

Выводы

Проведен анализ многолетних данных по волнению для различных пунктов наблюдения в прибрежной зоне о. Сахалин. Установлено, что приходу шторма предшествует приход длинноволновой зыби с периодами от 15 до 10 с. В дальнейшем периоды входящих волн уменьшаются и шторм приходит вместе с короткопериодной зыбью с периодами около 7 с.

Дано объяснение такому поведению зыби с использованием дисперсии этих волн и, как следствие, распространению их с разными скоростями. При этом групповая скорость длиннопериодных волн зыби, определяющая скорость переноса энергии, превышает 10 м/с, а короткопериодных волн составляет около 5 м/с.

Рассмотрен вопрос зависимости такого предвестника шторма от направления ветра, а значит, и направления подхода волн зыби к побережью. Для этого были построены векторы скорости ветра. Сравнение направлений вектора скорости ветра с моментами предваряющего прихода волн зыби показало, что более длинноволновая и ранее входящая зыбь соответствует юго-западным ветрам на момент прихода зыби в точку наблюдения. Из этого анализа можно заключить, что предваряющая шторм зыбь приходит при любых направлениях ветра, предшествующих шторму.

Проявление длинноволновой зыби является хорошим предвестником приближения шторма и может служить для приближенной оценки времени прихода штормового волнения в точку наблюдения. Зная скорости распространения волн и разность времен прихода, можно определить, на каком расстоянии находился источник шторма на момент прихода длинноволновой зыби. Кроме того, можно оценить минимальное время прихода шторма по времени первого прихода длинноволновой зыби и скорости волн для характерного периода волн на начало шторма 7–10 с.

Список литературы

1. Абузяров З.К. *Морское волнение и его прогнозирование*. Л.: Гидрометиздат, 1981. 164 с.
2. Боуден К. *Физическая океанография прибрежных вод*. М.: Мир, 1988. 324 с.
3. Рабинович А.Б. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 325 с.
4. 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, N 824. P. 527–560. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0005>
5. Hautala S., Thompson L.A., Kelly K. Surface Gravity Waves // *Thompson/Ocean 420/Winter 2004*. P. 1–6. URL: http://faculty.washington.edu/luanne/pages/ocean420/notes/gravity_waves.pdf (дата обращения: 20.08. 2018).
6. Munk W.H., Miller G.R., Snodgrass F.E., Barber N.F. Directional recording of swell from distant storms // *Philos. Trans. Royal Soc. London. A: Math. Phys. Sciences*. 1963. Vol. 255, N 1062. P. 505–584. <https://doi.org/10.1098/rsta.1963.0011>
7. Rego J.L., Li Ch. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36 (7). L07609. P. 5. <https://doi.org/10.1029/2008gl036953>
8. 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 // *Philos. Trans. Royal Soc. London. A: Math. Phys. Sciences*. 1966. Vol. 259 (1103). P. 431–497. <https://doi.org/10.1098/rsta.1966.0022>
9. Wadhams P. Attenuation of swell by sea ice // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78 (18). P. 3552–3563. <https://doi.org/10.1029/jc078i018p03552>
10. 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. P. 1-8. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/cb2b/ba1184c4089acf1ecf573aec05d48ab9df90.pdf> (дата обращения: 20.08. 2018).
11. Wright J., Colling A., Park D. *Waves, tides and shallow-water processes*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999. Second ed. 227 p. (The Open University). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-036372-1.x5000-4>

Сведения об авторах

КОВАЛЕВ Дмитрий Петрович, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, КОВАЛЕВ Петр Дмитриевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, КИРИЛЛОВ Константин Владиславович, научный сотрудник – лаборатория волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.