

## Исследования волнового поля с помощью автономного регистратора волнения АРВ-К14 в прибрежной зоне моря

© К. В. Кириллов

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

*E-mail: k.kirillov@imgg.ru*

Рассмотрен опыт эксплуатации автономного регистратора волнения АРВ-К14, предназначенного для долговременной периодической регистрации абсолютного давления морской или пресной воды, а также измерения температуры контролируемой среды. Прибор может применяться при мониторинге морской среды в прибрежной зоне в целях выявления опасных морских явлений для обеспечения безопасности прибрежных сооружений. Правильное использование регистратора с учетом его характеристик позволяет получать информацию о волнении в широком диапазоне периодов и связанных с этим волнением природных явлениях. Приведенные примеры обработки экспериментальных данных подтверждают правомерность выбора оборудования и мест для регистрации.

**Ключевые слова:** автономный регистратор волнения, натурные измерения, опасные морские явления.

## The investigation of wave field using autonomous wave recorder ARV-K14 in the coastal area

*Konstantin V. Kirillov*

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

*E-mail: k.kirillov@imgg.ru*

The experience of operation of the autonomous waves registrator ARV-K14 intended for long-term periodic registration of absolute pressure of sea or fresh water, and also measurement of temperature of the controlled environment has been considered. The registrator can be used in solving research problems of monitoring the marine environment in the coastal zone in order to identify dangerous marine phenomena, and to ensure the safety of coastal facilities. The correct use of the registrator allows measurements to obtain information about the waves in a wide range of periods and the associated waves of natural phenomena, characteristics of ARV-K14 being taken into account. The results of experimental data processing have confirmed the correct choice of equipment for registration and measurement sites.

**Keywords:** autonomous register of waves, natural measurements, dangerous marine phenomena.

### Введение

Изучение динамических процессов у берегов необходимо для традиционных видов морской деятельности человека – морского транспорта и рыбного промысла, для обеспечения безопасности прибрежных промышленных объектов, связанной с размывом берегов, представляющим угрозу поселкам, авто- и железным дорогам, расположенным

вблизи берега. Развитие нефтегазового комплекса в зоне шельфа также опирается на детальное исследование режимов волнения в прибрежной зоне моря, динамических процессов у берегов в местах предполагаемой постановки буровых платформ и добывающего оборудования, прокладки трубопроводов.

Особую опасность в прибрежной зоне и на самом берегу обычно представляют волны

цунами, штормовые нагоны, которые вызывают затопление прибрежных участков. На фоне повышения уровня моря резко усиливаются штормовое волнение, ветровые волны и зыбь, трансформирующиеся в узкой прибрежной полосе и способствующие возникновению инфрагравитационных волн и разрывных течений, с которыми связаны перемещения донных осадков, изменения донного рельефа и другие литодинамические процессы. Существуют и другие типы опасных морских явлений, проявление которых зависит от конкретного рельефа побережья и метеоусловий. Поэтому необходимы детальные исследования волновых процессов и выявление физических особенностей и механизмов генерации этих процессов, их пространственной и временной изменчивости, влияния на жизнедеятельность человека.

Наиболее эффективным способом изучения морских опасных явлений и оценки их режимно-статистических характеристик, необходимых для безопасного проектирования промышленных объектов на побережье и портовых гидротехнических сооружений, является проведение экспериментальных измерений волновых процессов непосредственно в районе планируемого строительства. К научным задачам проведения экспериментов следует отнести и методики постановки приборов в зависимости от типов измеряемого волнения. Здесь же должен быть учтен опыт эксплуатации приборов.

При этом надо иметь в виду, что измерения вблизи берега, особенно в районах, где сравнительно часто возникают штормовые ситуации, представляют большую сложность. Одним из средств для регистрации волновых процессов на небольшом удалении от берега служат кабельные донные станции, снабженные датчиками гидростатического давления. Как показали наблюдения на п-ове Камчатка [Kovalev et al., 1991], подобные системы могут сохраняться в течение достаточно продолжительного времени, причем давление на дне характеризует волновые нагрузки на подводные трубопроводы. Автономные приборы позволяют провести более детальный эксперимент и устанавливать регистраторы

волнения в местах, где невозможна постановка кабельных приборов. Поэтому без них зачастую нельзя обойтись при проведении натуральных наблюдений.

Существуют различные типы и модели приборов для регистрации придонного гидростатического давления. Актуальны для экспериментальных исследований правильный выбор измерителей волнения, разработка методики и описание опыта эксплуатации в применении к конкретным научным задачам.

### **Автономный регистратор волнения АРВ-К14**

С середины 1960-х годов Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН занимается инструментальными измерениями волновых процессов на шельфе и в прибрежной зоне [Ковалев, Ковалев, 2010], прежде всего длинных волн в диапазоне периодов цунами. Результаты обобщены в монографиях [Ефимов и др., 1985, Рабинович, 1993]. Для этих целей использовались регистраторы придонного гидростатического давления, данные усреднялись с периодом 1 мин.

Используемые АРВ производятся в СКТБ «ЭЛПА» (г. Углич) и обладают как достоинствами, так и недостатками. Главное достоинство регистраторов АРВ разработки СКТБ (включая модификацию К14) – регистрация придонного давления с дискретностью 1 с. Это открыло новые возможности инструментальных измерений, прежде всего в отношении ветрового волнения и инфрагравитационных волн в прибрежной зоне (постановка струнных волнографов весьма затруднительна). По сравнению с зарубежными аналогами привлекают низкая стоимость и рабочие параметры, удовлетворяющие текущим потребностям. К недостаткам стоит отнести не очень высокую надежность регистрации измеряемых параметров, которая проявляется в потерях данных при длительных сроках автономной работы.

Автономный регистратор волнения АРВ-К14 (далее регистратор) – это прибор погружного типа, предназначенный для

периодической регистрации абсолютного давления морской или пресной воды. Регистратор оснащен системой температурной компенсации, что позволяет одновременно с давлением измерять температуру контролируемой среды, обеспечивает непрерывную работу в течение 400 сут. Выполнен в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали. Корпус имеет отсек датчика и батарейный отсек. В отсеке датчика находятся измерительная камера и отсек электроники. Работа происходит в двух режимах: цифрового преобразователя и самописца. В режиме цифрового преобразователя АРВ подключается к ПК, что позволяет в реальном времени получать текущие значения давления и температуры, производить настройку и калибровку прибора, считывать накопленные в режиме самописца данные. В зависимости от режима работы регистратора микроконтроллер сохраняет данные в энергонезависимую память или осуществляет обмен данными с ПК.

Возможны различные варианты установки регистратора как на дне, так и в толще воды, а также включение его в состав морских исследовательских комплексов. Основные области применения АРВ-К14: гидрофизические исследования в труднодоступных районах на шельфе, в том числе подо льдом; для обеспечения безопасности мореплавания; мониторинг в портах, гаванях, бухтах; инженерные изыскания.

Верхний предел измерений по периоду волнения ограничен дискретизацией волнения и составляет 2 с. Однако практика показывает, что для уверенного восстановления исходного волнения в точке регистрации необходимо брать 4 отсчета на период, что составляет при заданной дискретности измерений 4 с. Это позволяет уверенно регистрировать ветровое волнение на глубинах до 10 м.

### Проведение натуральных наблюдений

Рассмотрим возможности АРВ-К14 для проведения натуральных наблюдений за волнением в открытом море на примере работы прибора, установленного в районе с. Взморье юго-восточной части о. Сахалин (рис. 1) на

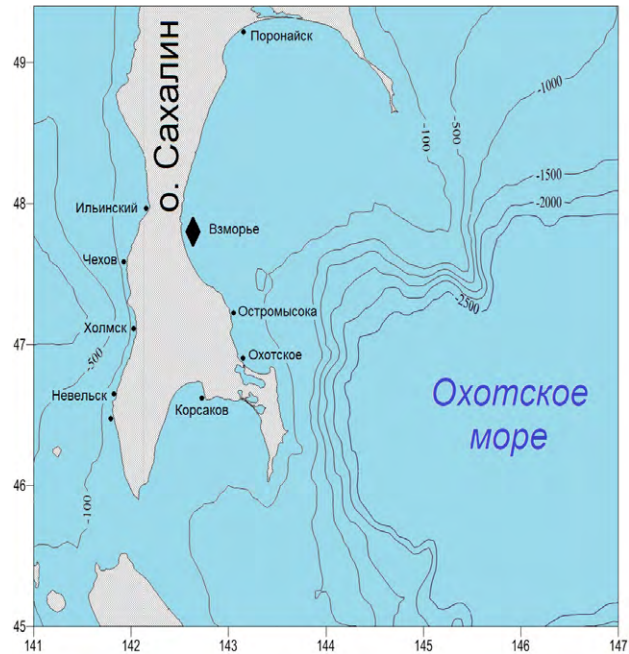


Рис. 1. Карта района проведения наблюдений.

глубине 10 м с дискретностью 1 с, в период 6 июня – 18 октября 2017 г.

Для долговременной регистрации метеорологических и океанографических данных на основе АРВ-К14 собираются океанографические буйковые станции (БС). Такая станция представляет собой плавучую конструкцию, помещаемую в какую-либо точку океана [Берто, 1979].

Исходя из опыта использования, для обеспечения максимальной стабильности процесса измерений буйковая станция включает: несущую плавучесть в виде буя из нескольких пустотелых шаров; буйреп из стального или синтетического троса; якорную систему в виде одного массивного якоря или набора нескольких якорей различной формы и меньшего размера. В ИМГиГ ДВО РАН разработана конструкция, в которой автономный цифровой регистратор волнения крепится к крепежной раме, устанавливается на дно и регистрирует придонное гидростатическое давление, обусловленное колебаниями морской поверхности. Крепежная рама представляет собой металлическую квадратную конструкцию со стороной  $\geq 0.7$  м из металлического уголка стороной  $\geq 50$  мм, с расположенным посередине утяжелителем  $\geq 18$  кг, к которому металлическими хомутами прикрепляется регистратор. Разработанный блок отличается

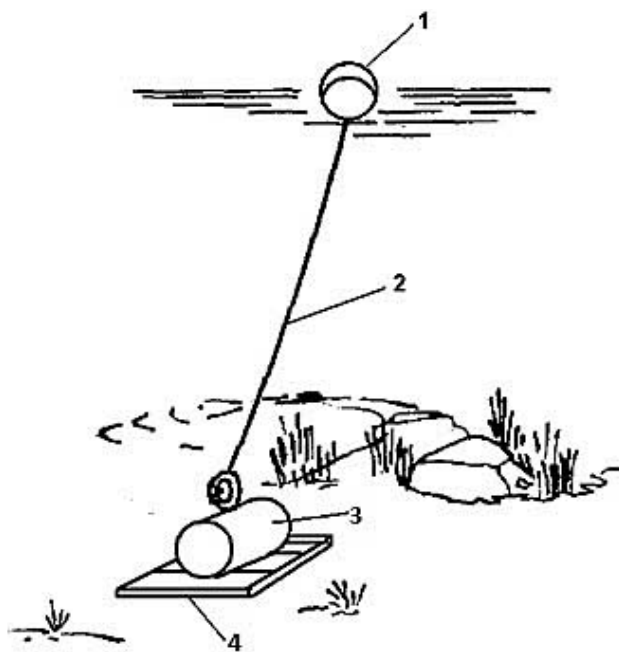


**Рис. 2.** Технологический образец крепежной рамы с регистратором волнения АРВ-К14-1 (в незакрепленном виде, без буйрепа и буя).

от аналогичных улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими как мобильность и живучесть, а также простотой конструкции и небольшой стоимостью.

Схема постановки автономного измерителя волнения с поверхностным буюм, используемая в ИМГиГ, приведена на рис. 3.

При постановке прибора использовался способ «якорь–буй»: первым за борт опускается якорь. Буйреп постоянно находится под высокой нагрузкой, поэтому, как правило, его перебрасывают через блок, буй опускается в последнюю очередь. При этом способе имеется возможность установить якорь в заранее намеченную точку, а кроме того, умень-



**Рис. 3.** Схема постановки автономного регистратора волнения с использованием поверхностной буйковой станции. 1 – поверхностный буй, 2 – буйреп, 3 – АРВ, 4 – рама, совмещенная с якорем.

шается опасность захлестывания буйрепа и вероятность повреждения его проходящими судами. К недостаткам этого способа следует отнести очень большие нагрузки на буйреп при интенсивном волнении. К тому же операции соединения секций буйрепа и прикрепления приборов, датчиков весьма трудоемки и продолжительны. Осложняют работу и неблагоприятные погодные условия. Постановка прибора у пирса производится по той же схеме, что и в море, за исключением того, что вместо бую буйреп закрепляется на пирсе.

Поверхностные буйковые системы, работающие в открытом море, подвергаются воздействию сильных ветров, волнения, океанических течений, что приводит к ухудшению качества измерений из-за вертикальных колебаний и горизонтальных движений бую, передаваемых через буйреп всей буйковой системе и, как следствие, донному регистратору волнения при сильном шторме. Для уменьшения шумового воздействия на донный прибор его крепят не непосредственно к якорю БС, а к отдельной раме или второму якорю и соединяют с основным тросом или цепью. При многократных штормах возможно перетаскивание прибора штормом и выбрасывание его на берег, а также отрыв поверхностного бую и потеря приборов. Еще надо учитывать, что постановка приборов с поверхностным буюм на длительный срок в покрываемых льдом морях, которые в основном и окружают Россию, невозможна. А приборы, устанавливаемые в местах интенсивного рыболовства, часто принимают за крабовые ловушки и, подняв, бросают, что ухудшает качество измерений, или обрезают буйреп, что приводит к потере приборов.

После извлечения АРВ из воды производится считывание накопленных в них данных в ПЭВМ, после чего эти данные подвергаются дальнейшей обработке и анализу.

#### Анализ полученных данных

В различных гидрологических и метеорологических условиях постановки прибора возможно получение данных о давлении и температуре. Вопрос о соответствии давления на дне высотам волн на поверхности детально исследовался путем организации

синхронных измерений различными приборами, в результате чего была разработана методика пересчета, позволяющая получить качественные материалы по ветровому волнению при глубине постановки прибора до 30 м [Заславский, Красницкий, 2001]. Разработанная в лаборатории волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН программа Кута позволяет восстанавливать истинные высоты волн за счет решения проблемы пересчета пульсаций гидростатического давления в параметры поверхностного волнения с учетом коэффициента поверхностного ослабления волн [Плеханов, Ковалев, 2016].

На рис. 4. представлен график вариаций измеренного придонного гидростатического давления, обусловленных колебаниями морской поверхности (ветровым волнением и изменениями уровня моря). На графике выделяются приливные и сезонные колебания. Штормовые ситуации можно определить по резкому усилению высокочастотной составляющей.

Для оценки интенсивности ветрового волнения принято использовать такую характеристику, как значимая высота волны (средняя из одной трети максимальных высот волн за заданный промежуток времени, по принятому в волновой теории стандарту – за 15 мин). Максимальные высоты волн рассчитывались для последовательных интервалов времени продолжительностью 15 мин (рис. 5).

На рис. 5, с учетом указанных оговорок относительно измерений волнения, за период наблюдений можно выделить несколько штормовых ситуаций:

- 1) с 8 по 14 июня, значимая высота волны составила 2 м,
- 2) с 17 по 20 июня – 0.8 м,
- 3) с 24 по 27 июня – 2.1 м,
- 4) с 7 по 14 августа – 1.37 м,
- 5) с 3 по 6 сентября – 1.5 м,
- 6) с 9 по 15 сентября – 1.53 м,
- 7) последняя, с 17 по 22 сентября, была наиболее сильной – 5.56 м.

На рис. 6 приведена диаграмма текущего спектра волнения в диапазоне периодов от 2 с до 10 мин. Расчет производился по последовательным отрезкам длительностью 15 мин, полученные значения спектральной плотности заносились в таблицу, на основе которой строилась диаграмма. Данный рисунок представляет изменение спектральных характеристик во времени.

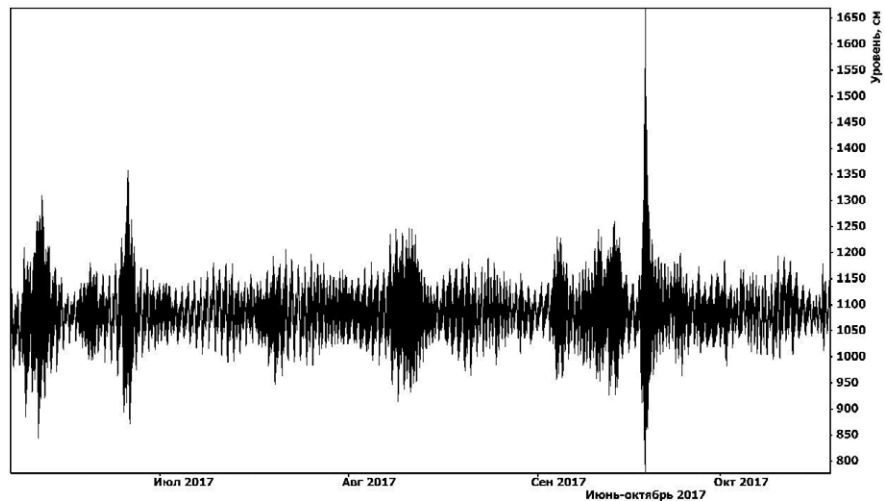


Рис. 4. График вариаций измеренных значений придонного гидростатического давления, пересчитанных в колебания поверхности моря (в см водного столба).

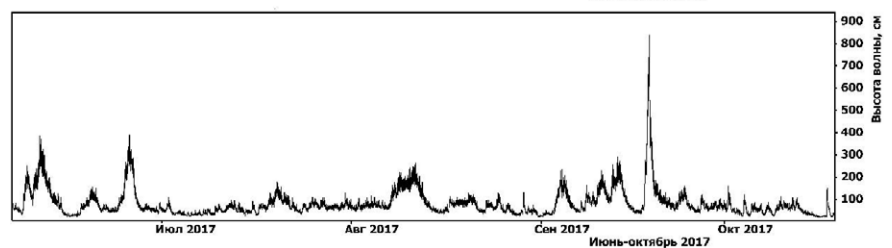
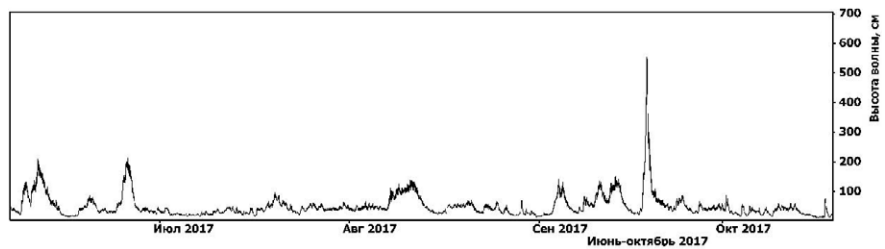
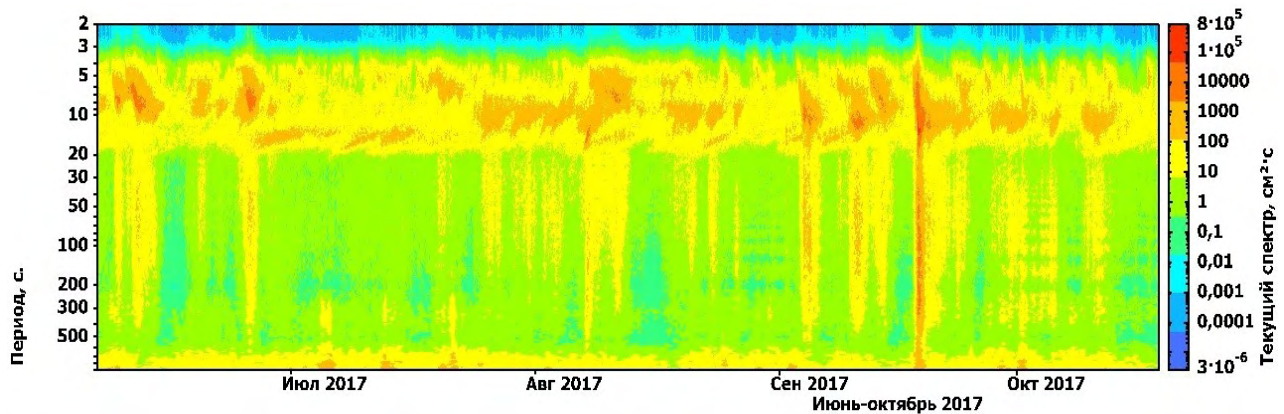
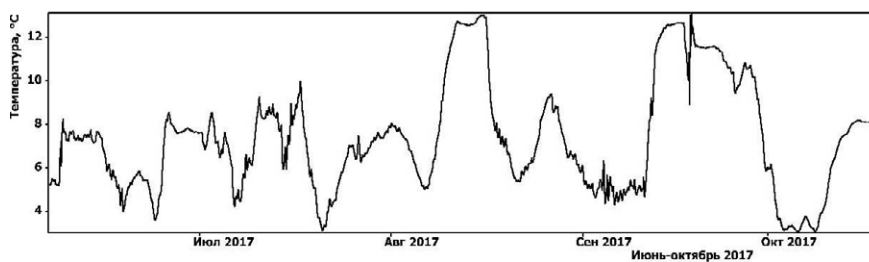


Рис. 5. Вариации значимой высоты волны (вверху) и максимальной высоты волны (внизу) в районе с. Взморье, по данным инструментальных измерений 06.06.2017–18.10.2017.



**Рис. 6.** Диаграмма текущего спектра волнения.  
На вертикальной оси периоды в секундах, на горизонтальной – время.



**Рис. 7.** Вариации температуры морской воды на горизонте 10 м в районе с. Взморье, по данным инструментальных измерений 06.06.2017–18.10.2017.

Анализ спектра волнения показывает, что в рассматриваемом диапазоне периодов основная энергия сосредоточена в интервале волн зыби, на периодах 7–10 с, эти волны присутствовали в записях практически постоянно. Более короткопериодные ветровые волны с периодами около 5 с обладают меньшей энергией и проявляются реже, как правило при штормовых ситуациях. Интересны наклонные полосы на диаграммах, указывающие на почти линейное изменение периода спектрального максимума со временем. Они обычно предшествовали штормовым ситуациям, которые начинаются с прихода низкочастотной зыби с периодом 20 с (в одном случае даже около 30 с). Это специфическая особенность, присущая волновому режиму у юго-восточного берега о. Сахалин [Плеханов, 2012].

*Регистрация инфрагравитационных волн с помощью АРВ-К14.* Интерес представляют случаи повышения энергии в диапазоне инфрагравитационных волн (30–300 с [Рабинович, 1993]). Они наблюдаются при штормовых ситуациях и на диаграммах текущего спектра проявляются в виде вертикальных линий со слабо выраженной модовой структурой. Такой вид текущего спектра

характерен для волновых процессов, в которых существенную роль играют составляющие с дискретным спектром – в данном случае захваченные краевые волны. С этим видом волновых движений, формирующихся в результате

трансформации в прибрежной зоне, связано формирование квазиритмических форм рельефа – цепочек фестонов и мегафестонов, практически повсеместно наблюдающихся на юго-восточном побережье о. Сахалин. Наиболее выражена такая структура берегового рельефа в районе с. Взморье [Горбунов и др., 2010].

*Регистрация температуры воды.* В период с 6 июня по 18 октября наблюдались значительные вариации температуры морской воды (рис. 7).

Резкие понижения температуры морской воды у юго-восточного побережья о. Сахалин связывались в работе [Шевченко, Кириллов, 2017] с проявлением прибрежного апвеллинга, индуцируемого ветрами Ю-Ю-З румбов, характерными для летнего сезона (летний муссон) [Като и др., 2001]. Максимальное значение 13 °С отмечено 15 августа, а минимальное 3 °С – 8 октября. За время наблюдений можно выделить несколько периодов, когда температура воды понижалась, последнее понижение отмечено с 28 сентября по 15 октября, интересной особенностью было позднее проявление апвеллинга [Шевченко, Кириллов, 2017].

Эти и другие результаты получены благодаря правильному выбору регистратора и мест его постановки при использовании АРВ-К14 для полевых работ.

### Выводы

Приведенные результаты обработки экспериментальных данных подтвердили правильный выбор оборудования для регистрации и мест измерения и показали, что, исходя из опыта эксплуатации регистратора, при постановке прибора необходимо учитывать различные факторы, определяющие качество получаемых данных.

На примерах регистрации различных типов волнения показано, что АРВ-К14 позволяет получать натурные данные в цифровом виде высокого качества для последующего анализа. Верхний предел измерений по периоду ограничен дискретизацией волнения и составляет 2 с. Однако, исходя из практического опыта, для уверенного восстановления исходного волнения в точке регистрации необходимо брать 4 отсчета на период, что составляет при заданной дискретности измерений 4 с. Это позволяет уверенно регистрировать ветровое волнение на глубинах до 10 м. Здесь не рассматривается проблема регистрации волнения, которое ослабляется с глубиной постановки прибора, потому что теоретически этот вопрос достаточно изучен, а программные средства, обрабатывающие натурные данные, позволяют восстанавливать истинные высоты волн.

Применение такой регистрирующей аппаратуры, как АРВ-К14, эффективно для исследования инфрагравитационных волн. Опыт, накопленный в результате многолетней эксплуатации регистратора, позволяет получать новые результаты для данного класса волнения как в условиях открытого моря, так и в прибрежной зоне.

### Список литературы

1. Берто Г.О. *Океанографические буи*. Л.: Судостроение, 1979. 216 с.
2. Горбунов А.О., Шевченко Г.В., Чернов А.Г., Ковалев П.Д., Частиков В.Н. Природные условия замывания протоки озера Изменчивое (юго-восточное побережье острова Сахалин) // *Вестн. ДВО РАН*. 2010. № 3. С. 93–102.
3. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. *Волны в пограничных областях океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
4. Заславский М.М., Красицкий В.П. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн // *Океанология*. 2001. Т. 41, № 2. С. 195–200.
5. Като Э., Савельев В.Ю., Шевченко Г.В. Режимные характеристики ветра для острова Сахалин, полученные на основе инструментальных данных // *Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 177–194.
6. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. *Техника исследования опасных морских явлений в прибрежной зоне океана*. Владивосток: Дальнаука, 2010. 152 с.
7. Плеханов Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // *Учен. записки Сахалинского гос. ун-та*. 2015. № 11/12. С. 35–38.
8. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов = [Plekhanov Ph.A., Kovalev D.P. The complex program of processing and analysis of time-series data of sea level on the basis of author's algorithms] // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 44–53.
9. Рабинович А.Б. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 240 с.
10. Шевченко Г.В., Кириллов К.В. Вариации температуры воды у побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 3. С. 68–78. [Shevchenko G.V., Kirillov K.V. Water temperature variations of the Sakhalin coast from the data of instrumental observations. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, 42(3): 189-197. <https://doi.org/10.3103/s1068373917030062>]
11. Kovalev P.D., Rabinovich A.B., Shevchenko G.V. Investigation of long waves in the tsunami frequency band on the southwestern shelf of Kamchatka // *Natural Hazards*. 1991. Vol. 4, N 2/3. P. 141–159. <https://doi.org/10.1007/bf00162784>

Сведения об авторе

КИРИЛЛОВ Константин Владиславович, младший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.