

Короткоживущие неоднородности термохалинной структуры вод

в районе к востоку от зал. Петра Великого, Японское море

(по данным профилографа «Аквалог»)

Трусенкова О.О.¹, Лазарюк А.Ю.¹, Островский А.Г.², Ладыченко С.Ю.¹, Лобанов В.Б.¹

¹ТОИ ДВО РАН, trolia@poi.dvo.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Введение

Приморское течение, холодное западное пограничное течение Японского моря, следует на юго-запад вдоль побережья Приморского края. Для Японского моря вообще характерны узкий шельф и значительные уклоны рельефа дна, а в этом районе уклон может превышать 1000 м на 10 км расстояния поперек склона, что благоприятствует неустойчивости течения и формированию синоптических вихрей, перемещающихся на юго-запад вместе с течением, а также развитию различных мод шельфовых волн. Динамика осложняется притоком теплых вод с востока из зоны Цусимского течения и с юга из района поднятия Ямато к южному Приморью. С вихревыми структурами связаны значительные вертикальные колебания изопикнических поверхностей и изменения вертикальной термохалинной стратификации на малых временных масштабах, которые сложно зарегистрировать по данным судовых измерений, но можно наблюдать с помощью автономных устройств, выполняющих измерения с высокой временной дискретностью в течение достаточно длительного времени. Такие измерения проводились с помощью притопленной буйковой станции с профилографом «Аквалог» на континентальном склоне к востоку от зал. Петра Великого в теплый период 2015 г., что позволило получить уникальные данные о гидрологических характеристиках в этом динамически активном районе.

Анализ полученных данных позволил определить характерные масштабы колебаний в слое с плотностью 27.25 кг/м^3 , залегавшем на промежуточных глубинах диапазона профилирования (Трусенкова и др., 2018). Колебания с периодами 2–3.5 и 8–13 суток и весьма изменчивой амплитудой были соотнесены с временем прохождения над станцией мезомасштабных и синоптических вихрей. Были выделены более регулярные колебания с периодом 18–22 суток, которые, возможно, были связаны с волновыми процессами. С середины апреля до конца мая наблюдались весьма интенсивные колебания пикноклина (Лазарюк и др., 2017): сначала углубление, затем поднятие, а затем снова углубление, продолжавшиеся около 2-х недель каждое, но в дальнейшем подобных колебаний зарегистрировано не было. Следует также отметить, что не было обнаружено корреляции колебаний пикноклина с прохождением атмосферных неоднородностей (циклоны, фронты) или с усилением ветра, преимущественно нагонного (Трусенкова, 2018). Вероятно, отклик на ветровое воздействие должен проявляться в приповерхностном слое, то есть выше верхнего горизонта профилирования «Аквалага».

Цель данной работы – оценка согласованности по глубине термодинамических процессов, поиск короткоживущих неоднородностей термохалинной структуры, связанных с выявленными изменениями стратификации, которые могли бы отражать интрузии вод с иными свойствами, а также соотнесение термохалинных и энергетических характеристик, основанных на измерениях «Аквалога».

Данные

Профилограф «Аквалог» (Островский и др., 2013) был установлен на континентальном склоне в зоне Приморского течения (42.5° с.ш., 133.8° в.д.; глубина места – 440 м) в период с 18 апреля по 15 октября 2015 г. Измерения с дискретностью по глубине 0.2–1 м выполнялись 4 раза в сутки на глубинах 64–300 м, а каждые 6-е сутки на глубинах 64–420 м. Конфигурация профилографа, инструменты, первичная обработка и коррекция данных подробно обсуждаются в работе (Лазарюк и др., 2017). Здесь анализируются временные ряды глубин залегания поверхностей с плотностью 27.05, 27.1, 27.15, 27.2, 27.25 кг/м³ (для краткости они обозначены как D27.05, D27.1, D27.15, D27.2, D27.25 соответственно), а также ряды температуры, частоты Брента-Вайсяля и кинетической энергии (на 1 м глубины и на 1 м² площади) на D27.05 – D27.25.

Результаты и обсуждение

Столб воды от горизонта 64 м до дна, в котором проводились измерения, находился под сезонным пикноклином субарктической структуры вод, характерной для этого района Японского моря, вследствие чего плотность в период измерений изменялась в диапазоне 26.70–27.315 кг/м³. D27.1, D27.15 и D27.2 располагались в диапазоне глубин 64–300 м в течение всего периода измерений, D27.05 несколько раз поднималась выше горизонта 64 м на 0.5–1.5 суток и один раз на 6 суток (2–7 мая), а D27.25 несколько раз опускалась ниже 300 м (на 1–1.5 суток). Представленные на рис. 1а глубины залегания D27.05 – D27.25 отражают вертикальные колебания в поле плотности на временных масштабах от 2–3 суток до месяца, связанные с прохождением динамических структур, как это было показано ранее (Трусенкова и др., 2018). Наибольший размах вертикальных колебаний, со среднеквадратическим отклонением (СКО) глубины, превышающим 30 м, наблюдался для D27.15–D27.25, где были зафиксированы наиболее интенсивные вертикальные смещения (Табл. 1). Статистическая взаимосвязь между этими временными рядами весьма тесна (Табл. 2), что говорит о согласованности колебаний. Колебания ослабевали к поверхности: СКО составляло около 20 и 10 м для глубин D27.1 и D27.05 соответственно.

Частоты Брента-Вайсяля на D27.1 и D27.05 составляли в среднем 2.6 цикл/ч, СКО равнялись 0.7–0.7 цикл/ч, т.е. стратификация в этом слое была достаточно сильной. В нижележащих слоях стратификация была значительно ослаблена: от D27.15 к D27.25 частота Брента-Вайсяля уменьша-

лась почти вдвое (Табл. 1). Умеренная статистическая взаимосвязь обнаружена только для D27.1 и D27.05: коэффициент корреляции между частотами Брента-Вайсяля равнялся 0.42, для других слоев какой-либо согласованности не обнаружено. Отношение СКО к среднему уменьшалось от 30% для D27.05 и D27.1 к 15% для D27.15 и увеличивалось до 20% для D27.1 и 30% для D27.25, т.е. изменчивость стратификации сначала ослабевала, а потом усиливалась с глубиной. На D27.15, где СКО имеет локальный минимум относительно среднего, высокочастотная изменчивость ниже, чем в других слоях, но хорошо выражены колебания с периодом около 20 сут.

Наибольшая изменчивость и согласованность колебаний температуры (и соответственно солености) наблюдалась на D27.05 –D27.15: СКО составляло 10–15% средних величин, значительны и коэффициенты корреляции, в то время как в нижележащих слоях практически не согласованная изменчивость была гораздо слабее (Табл. 1, 2). Примечательно, что на D27.1 – D27.2 температура (и соответственно соленость) резко возрастала при их поднятии и убывала при опускании (рис. 1б): коэффициенты корреляции между временными рядами глубины и температуры составляли от -0.48 до -0.54. На D27.05 –D27.15 обнаружена достаточно тесная статистическая взаимосвязь между температурой и частотой Брента-Вайсяля: коэффициенты корреляции составляли 0.45–0.56, т.е. при увеличении температуры стратификация усиливалась.

Появление более теплой и соленой воды в изопикнических слоях можно связать с интрузией трансформированных субтропических вод с востока (Danchenkov et al., 2006) или с юга от района поднятия Ямато (Никитин, Юрасов, 2008). Подтвердить это можно было бы, привлекая спутниковые данные, чему, к сожалению, препятствует значительная облачность в теплый период 2015 г. Тем не менее, на рис. 2 приведены в качестве примера спутниковые снимки, демонстрирующие интрузии теплых вод с вихрями и струями. Имели, однако, место ситуации, когда при изменениях глубины изопикнических слоев температура и частота Брента-Вайсяля не изменялись. Наиболее характерны в этом смысле периоды 20–30 апреля и 16–31 мая, когда происходило существенное углубление пикноклина (рис. 1б). В конце мая вблизи места установки станции проходил крупный антициклонический вихрь, который, вероятно, переносил воду Приморского течения (рис. 2).

Кинетическая энергия течений уменьшалась в 3.5 раза от D27.05 до D27.25, однако ее изменчивость была согласована во всех слоях, что подтверждается тесной статистической взаимосвязью, хотя при удалении слоев друг от друга согласованность ослабевает (Табл. 1, 2). Изменчивость кинетической энергии очень велика: соотношение средних и СКО близко к 100%, причем периоды больших значений и высокой изменчивости перемежаются периодами с близкими к нулю величинами и слабой изменчивостью (рис. 3). При этом может происходить быстрый рост и быстрое уменьшение, или быстрый рост и относительно медленное уменьшение, или относительно медленный рост и быстрое уменьшение кинетической энергии (рис. 3). Периоды энергичных движений были короче, а стагнация – более длительна, что особенно четко выражено на D27.25 (рис. 3).

Следует отметить периоды стагнации 20–26 апреля и 16–31 мая на фоне значительного прогиба вниз всех изопикнических поверхностей и слабой изменчивости температуры, тогда как при их подъеме с конца апреля по середину мая наблюдались всплески кинетической энергии. В июне происходили интенсивные колебания пикноклина (рис. 1а) с периодами 2–3.5 сут. (Трусенкова и др., 2018), которые сопровождалась всплесками кинетической энергии (рис. 3). В частности, 4–5 июня наблюдался особенно значительный прогиб изопикнических поверхностей (D27.25 опустилась ниже 350 м), а 6 июня кинетическая энергия достигла абсолютного максимума за время наблюдений. Всплески кинетической энергии наблюдались также в другие периоды резких колебаний пикноклина, но полного соответствия не наблюдалось, статистически значимой взаимосвязи между глубиной изопикнических поверхностей и кинетической энергией также не обнаружено.

Выводы

По данным заякоренного профилографа «Аквалог», установленного на континентальном склоне в районе к востоку от залива Петра Великого в апреле – октябре 2015 г., выявлено:

1. Наиболее интенсивные вертикальные движения имели место в слое с плотностью 27.1 – 27.2 кг/м³, в котором вертикальная стратификация существенно ослаблялась с глубиной.
2. На изопикнических поверхностях наблюдались значительные термохалинные аномалии, согласованные в диапазоне плотности 27.1 – 27.2 кг/м³, что свидетельствует об интрузиях вод с иными характеристиками и, возможно, о диапикническом перемешивании.
3. Во всей толще вод наблюдались согласованные колебания кинетической энергии течений, причем высокоэнергетические всплески прерывались более длительными периодами стагнации.

Литература

Лазарюк А.Ю., Каплуненко Д.Д., Островский А.Г., Лобанов В.Б., Трусенкова О.О., Ладыченко С.Ю. Экспериментальные исследования изменчивости термохалинной структуры вод над континентальным склоном северо-западной части Японского моря // *Океанологические исследования*. 2017. № 45. С. 33-51.

Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 5. С. 2-57.

Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.

Трусенкова О.О., Лазарюк А.Ю., Островский А.Г., Лобанов В.Б., Каплуненко Д.Д. Коротко-периодная изменчивость вертикальной стратификации вод на континентальном склоне в районе залива Петра Великого (Японское море) // *Вестник ДВО РАН*. 2018. № 1. С. 49-59.

Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea // *Oceanogr.* 2006. V. 19. N 3. P. 18-31.

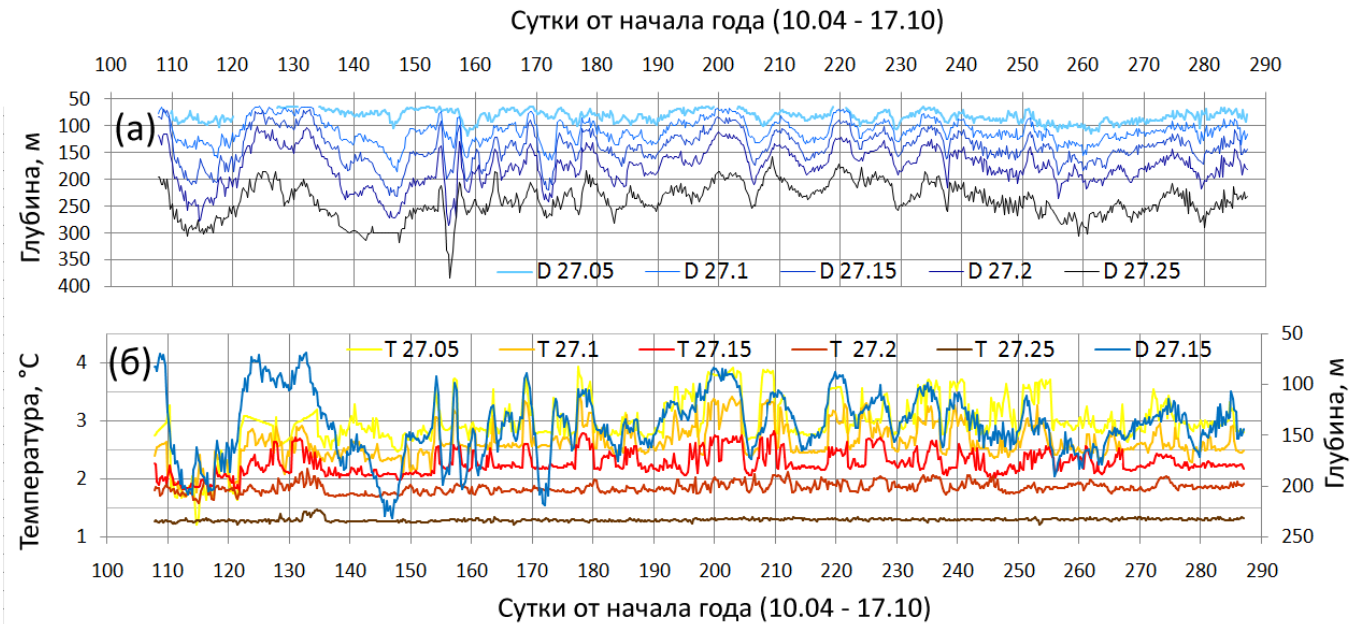


Рис. 1. Временные ряды глубины (м) поверхности D27.05 –D27.25 (а) и соответствующей температуры воды (°C) (б). Для сравнения на рисунке (б) показана глубина (м) поверхности D 27.15, (см. шкалу на правой вертикальной оси).

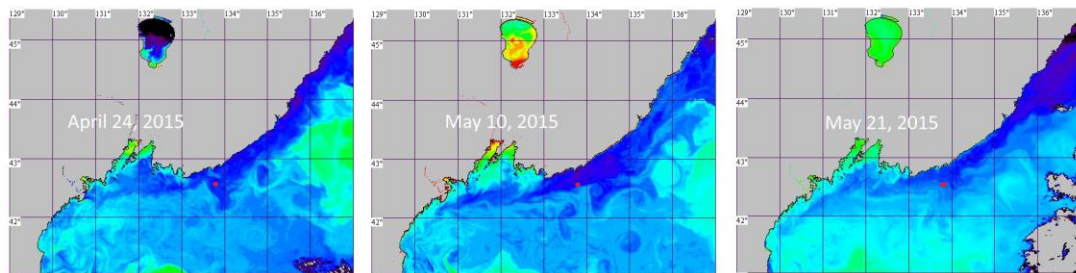


Рис. 2. Изображения поверхности северо-западной части Японского моря в инфракрасном диапазоне по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA; синий цвет соответствует холодным водам, желтый и красный цвета – теплым. На каждом изображении используется индивидуальная цветовая шкала. Положение буйковой станции с «Аквалогом» показано красной точкой.

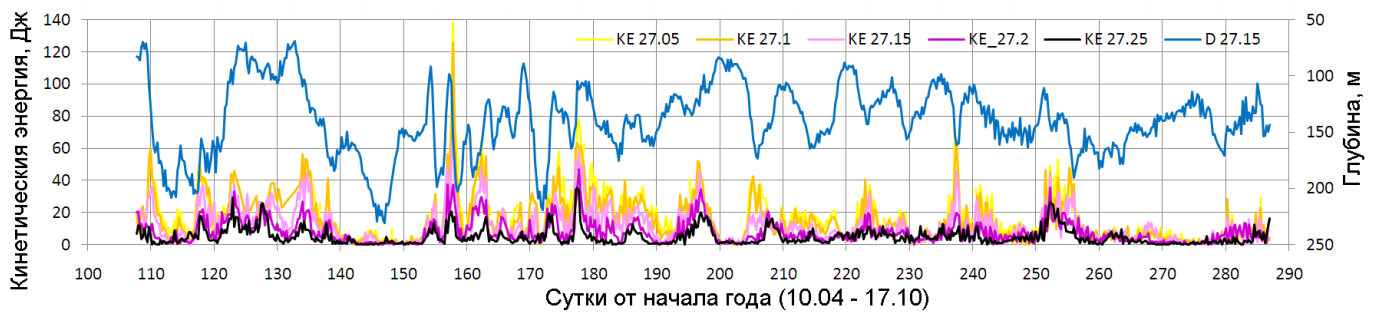


Рис. 3. Временные ряды кинетической энергии (Дж) на D27.05 –D27.25. Для сравнения показана глубина (м) поверхности D 27.15 (см. шкалу на правой вертикальной оси).

Таблица 1. Средние величины и СКО глубины поверхностей D27.05 –D27.25 и соответствующей температуры (°С), кинетической энергии (Дж) и частоты Брента-Вайсяля (цикл/ч).

Глубина (м)					
	27.05	27.10	27.15	27.20	27.25
Среднее	80.1	109.2	139.7	176.3	240.1
СКО	11.5	22.0	31.2	34.9	32.4
Температура (°С)					
	27.05	27.10	27.15	27.20	27.25
Среднее	2.97	2.62	2.27	1.85	1.30
СКО	0.43	0.31	0.20	0.09	0.03
Частота Брента-Вайсяля (цикл/ч)					
	27.05	27.10	27.15	27.20	27.25
Среднее	2.6	2.3	2.3	1.9	1.3
СКО	0.8	0.7	0.3	0.4	0.4
Кинетическая энергия (Дж)					
	27.05	27.10	27.15	27.20	27.25
Среднее	17.4	15.5	11.7	7.7	4.9
СКО	15.4	14.2	10.5	7.1	5.1

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между глубинами поверхностей D27.05 –D27.25 (слева), а также между временными рядами температуры на этих поверхностях (в центре) и между временными рядами кинетической энергии течений (справа); значимый коэффициент для 95%-го уровня статистической значимости и 25 степеней свободы равен 0.381.

Глубина					Температура					Кинетическая энергия				
σ_θ	27.05	27.10	27.15	27.20	σ_θ	27.05	27.10	27.15	27.20	σ_θ	27.05	27.10	27.15	27.20
27.10	0.71				27.10	0.83				27.10	0.95			
27.15	0.55	0.94			27.15	0.65	0.72			27.15	0.86	0.90		
27.20	0.44	0.85	0.94		27.20	0.36	0.37	0.46		27.20	0.71	0.76	0.84	
27.25	0.35	0.69	0.79	0.88	27.25	0.18	0.14	0.2	0.39	27.25	0.48	0.51	0.60	0.72