Спектральный и вейвлет-анализ аномалий уровня Японского моря

А.Е. Зверева

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова
Санкт-Петербург, 199397, Россия
E-mail: Anastasia.eug.zvereva@gmail.com

В данной работе исследуются низкочастотные колебания аномалий уровня Японского моря за 1992–2012 гг. на основе спутниковой альтиметрической информации. С помощью спектрального анализа выделены основные временные масштабы колебаний – 4, 2,5, 1 и 0,5 года. В результате вейвлет-анализа выявлена существенная нестационарность колебаний уровня. Наличие нелинейного перераспределения энергии между энергонесущими частотами связано с «Колмогоровским каскадным механизмом» передачи энергии в направлении от крупномасштабных движений к мелкомасштабным, а также с явлением «отрицательной вязкости» при потоках в обратном направлении. В рамках развития гипотезы о волновом характере низкочастотных колебаний уровня Японского моря к временным рядам альтиметрических данных был применен частотно-направленный спектральный анализ, результаты которого позволили оценить основные параметры низкочастотных волн годового масштаба, их направления распространения, отнести их к классу градиентно-вихревых волн, а также показать сложную пространственную структуру. Полученные результаты согласуются с ранее выдвинутой гипотезой о стояче-поступательном характере градиентно-вихревых волн в поле уровня Японского моря, которые представляют собой систему узловых линий с распространяющимися между ними прогрессивными волнами Россби (Зверева, Фукс, 2014, 2016).

Ключевые слова: волны Россби, альтиметрия, стояче-поступательные волны, Японское море, спектральный анализ, частотно-направленный спектр

Одобрена к печати: 29.09.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-114-120

Для анализа изменчивости динамических условий в Японском море был выбран массив альтиметрических данных аномалий уровня за временной интервал 14.10.1992–08.02.2012 с дискретностью 7 суток, полученный из банка данных AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) Французского космического агентства (CNES – Centre National d'Études Spatiales) (www.aviso.altimetry.fr/duacs/). Далее, детально будут рассмотрены колебания уровня в отдельных точках, расположенных в центральной части акватории (39°–40° с.ш., 133°–135° в.д.) и по обе стороны от субарктического фронта (42°–43° с.ш., 133°–135° в.д. и 37°–38° с.ш., 133°–135° в.д.), являющегося одной из основных динамических структур Японского моря и разделяющих его на субарктическую и субтропическую области (Юрасов, Яричин, 1991).

При анализе карт аномалий уровня было замечено, что пространственная изменчивость полей аномалий уровня Японского моря может быть охарактеризована как чередование циклонических и антициклонических структур. Для объяснения пространственно-временной изменчивости океанологических полей в замкнутых морях в статьях (Зверева, Фукс, 2014, 2016) на основе анализа спутниковых альтиметрических измерений была предложена феноменологическая модель стояче-поступательных градиентно-вихревых волн. В поле уровня такие волны могут быть выделены благодаря зонам конвергенции и дивергенции течений. Целью настоящей работы является подробный анализ спектральной структуры волновых колебаний уровня Японского моря.

Для выделения основных периодов анализируемых рядов аномалий уровня был применен спектральный анализ. Графики распределения спектральной плотности по периодам в пункте 42° с.ш., 135° в.д., так же как и в других пунктах Японского моря, имеют очевидные максимумы на периодах 4, 2,5, 1 и 0,5 года (*рис. 1*). Квазидвухлетние и полугодовые колебания выделены на спектрограмме гораздо слабее, чем колебания годового масштаба, но при этом несут приблизительно равное количество энергии. Низкочастотная часть спектра имеет довольно широкий пик по сравнению с годовым и полугодовым масштабами.

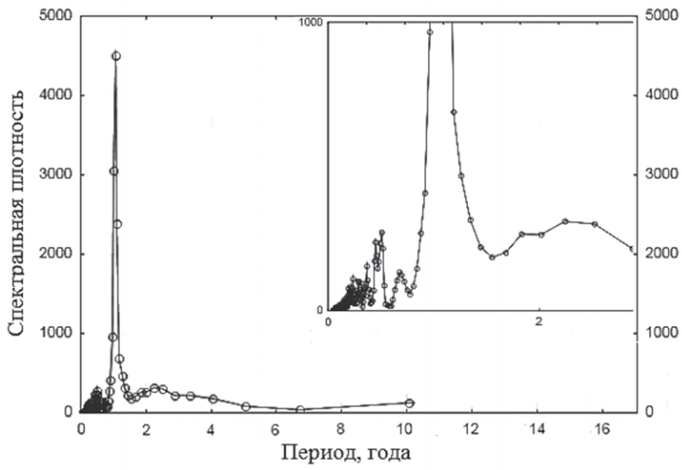

Рис. 1. Спектрограмма аномалий уровня Японского моря в пункте 42° с.ш., 135° в.д.

Согласно работам многих исследователей, колебания уровня Японского моря отличаются существенной нестационарностью, что требует привлечения специализированных методов анализа (Астафьева, 1996; Витязев, 2001; Белоненко и др., 2009).

Вейвлет-разложение используют в тех случаях, когда результат анализа сигнала должен не только выявить характерные временные масштабы процесса, но и дать сведения о пространственных координатах точек или моментах времени, в которых эти частоты проявляют себя. Для оценки нестационарности внешнего энергоснабжения исследуемых процессов и внутреннего нелинейного распределения энергии между процессами различных временных масштабов выполнен вейвлет-анализ аномалий уровня (*рис. 2*). Картина распределения энергии по масштабам носит сложный характер. Хорошо выражены максимумы на годовом масштабе на всем временном отрезке. Полугодовой масштаб проявляется в отдельные отрезки времени, получая энергию от годовых колебаний и, в свою очередь, подпитывая его. Такие потоки хорошо заметны по наклону изолированных областей. Так, поток от крупномасштабных движений к мелкомасштабным известен в классических работах по статистическому анализу как «колмогоровский каскадный механизм» диссипации энергии. Потоки, направленные в обратную сторону, связаны с так называемой «отрицательной вязкостью» (Старр, 1971; Сеидов, 1989). Годовые колебания в 1996–1997 и 2006–2007 годов получают энергию от 2,5-годичных и 4-летних колебаний соответственно.

Сезонному масштабу соответствует большее разнообразие процессов, чей характер может быть обусловлен годовым ходом поступления солнечной энергии, муссонным характером климатических условий региона, астрономическими параметрами (Смирнов, Воробьев, 2002; Полякова, 2013). Полугодовые колебания уровня могут быть связаны с обертонами годовых колебаний (Белоненко и др., 2009). Наличие квазидвухлетних колебаний обуславливается распределением теплых вод течениями Японского моря (Hirose, Ostrovskii, 2000; Choi et al., 2004) или нелинейным обменом энергии между различными энергонесущими частотами (Сеидов, 1989).

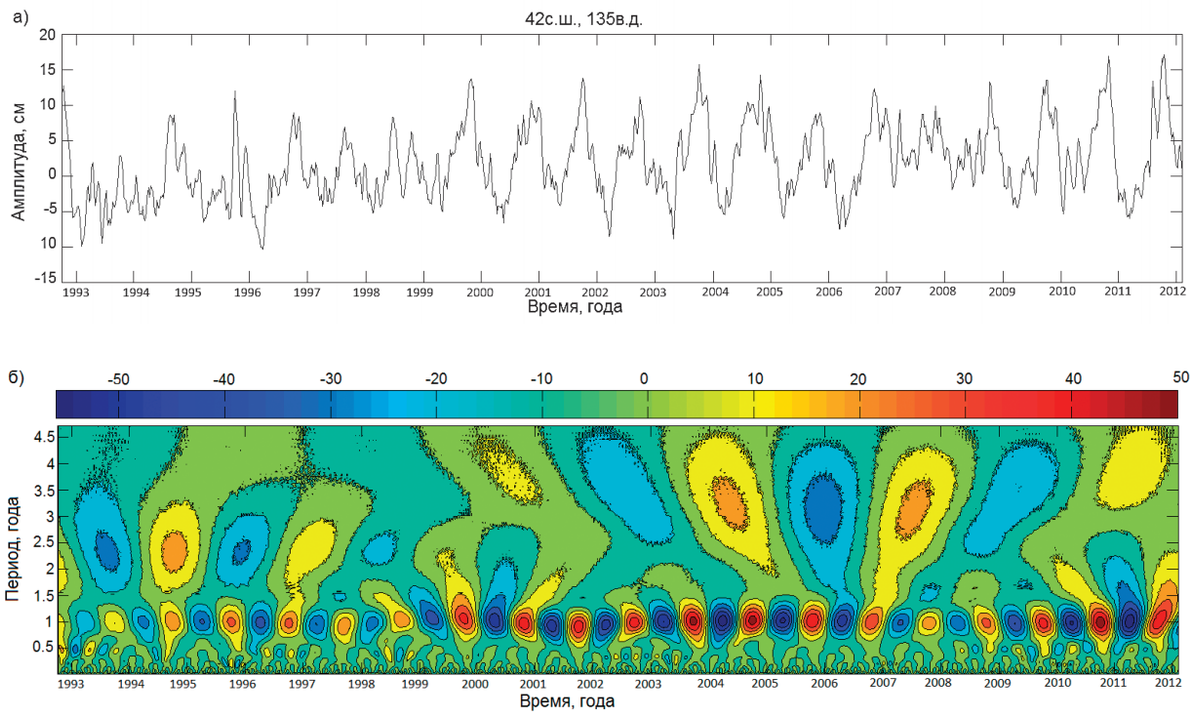

Рис. 2. График хода (а) и вейвлет-изображение (б) аномалий уровня в пункте 42° с.ш. 135° в.д.

С целью определения наличия или отсутствия существенных гармонических составляющих в исследуемых рядах и оценки тесноты связи стационарных временных рядов на различных частотах традиционно применяется взаимный спектральный анализ (Гренджер, Хатанака, 1972).

Так как в данной работе колебания уровня Японского моря воспринимаются как сложный полициклический случайный волновой процесс, представляющий суперпозицию и нелинейное взаимодействие волнообразных возмущений, далее, для анализа аномалий уровня в рамках волновой гипотезы был проведен частотно-направленный спектральный анализ в выбранных точках района исследования. Преимущество частотно-направленного спектрального анализа над взаимным спектральным заключается в том, что он позволяет оценивать распределение спектральной плотности и фаз по направлениям, в отличие от классического, где может быть рассмотрено только одно направление между двумя выбранными точками.

Расчет спектров аномалий уровня Японского моря выполнялся по разработанной в СПО «ГОИН» (Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова) программе, используемой при анализе скалярных гидрометеорологических полей. За основу программы был взят метод оценивания частотно-направленной спектральной плотности $S(\omega,\theta)$ по частотным спектрам волн и волновых уклонов, измеренных синхронно, предложенный в работе (Свешников, 1959).

Результаты частотно-направленного спектрального анализа для выбранных областей на севере (42°–43° с.ш., 133°–135° в.д.), юге (37°–38° с.ш., 133°–135° в.д.) и центральной области (39°–40° с.ш., 133°–135° в.д.) Японского моря показали явный максимум на периоде примерно 1 год. Длины выделенных волн имеют значения порядка внешнего радиуса деформации Россби для данных широт и глубин (R≈2000 км) (*табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики низкочастотных волн, полученные с помощью частотно-спектрального анализа

Район	***Период, сут***	***Длина волны, км***	***Направление, °***	***Скорость, см/с***
42°–43° с.ш. 133°–135° в.д.	416	2338	220	7,4
39°–40° с.ш. 133°–135° в.д.		1949	50	6,2
37°–38° с.ш. 133°–135° в.д.		2042	210	6,5

На севере и на юге акватории волнение на данном временном масштабе распространяется преимущественно на запад, в то время как в центральной части – на восток. Помимо доминирующего направления на изображениях (*рис. 3*) можно выделить волнение противоположных румбов. Для центральной области Японского моря дополнительный максимум на годовом масштабе распространяется в направлении 240°, тогда как для севера и юга – 40°–50°. Полученные характеристики выделенных волн позволяют отнести их к классу градиентно-вихревых. Наличие вторичных максимумов может быть объяснено формальным математическим представлением стоячих волн в виде двух противоположно направленных поступательных волн. Для подавления этих эффектов была проведена демодуляция исследуемых колебаний уровня путем вычитания энергии отраженных волн из энергии падающей волны.

Демодулированные спектры для севера и юга акватории содержат максимумы на годовом масштабе все так же в западном направлении, тогда как в центральной части увеличился вклад энергии на соседних временных масштабах при сохранении прежних восточных и западных направлений. Предположительно, данное распределение связано с положением выбранных точек в области субарктического фронта, где велико влияние недостаточно изученных фронтальных волн.

Результаты частотно-направленного спектрального анализа объясняют наличие описанных в статьях (Белоненко и др., 2012; Volkov et al., 2013; Зверева, Фукс, 2014, 2016) узловых линий в поле уровня, между которыми на запад распространяются несущие прогрессивные градиентно-вихревые волны.

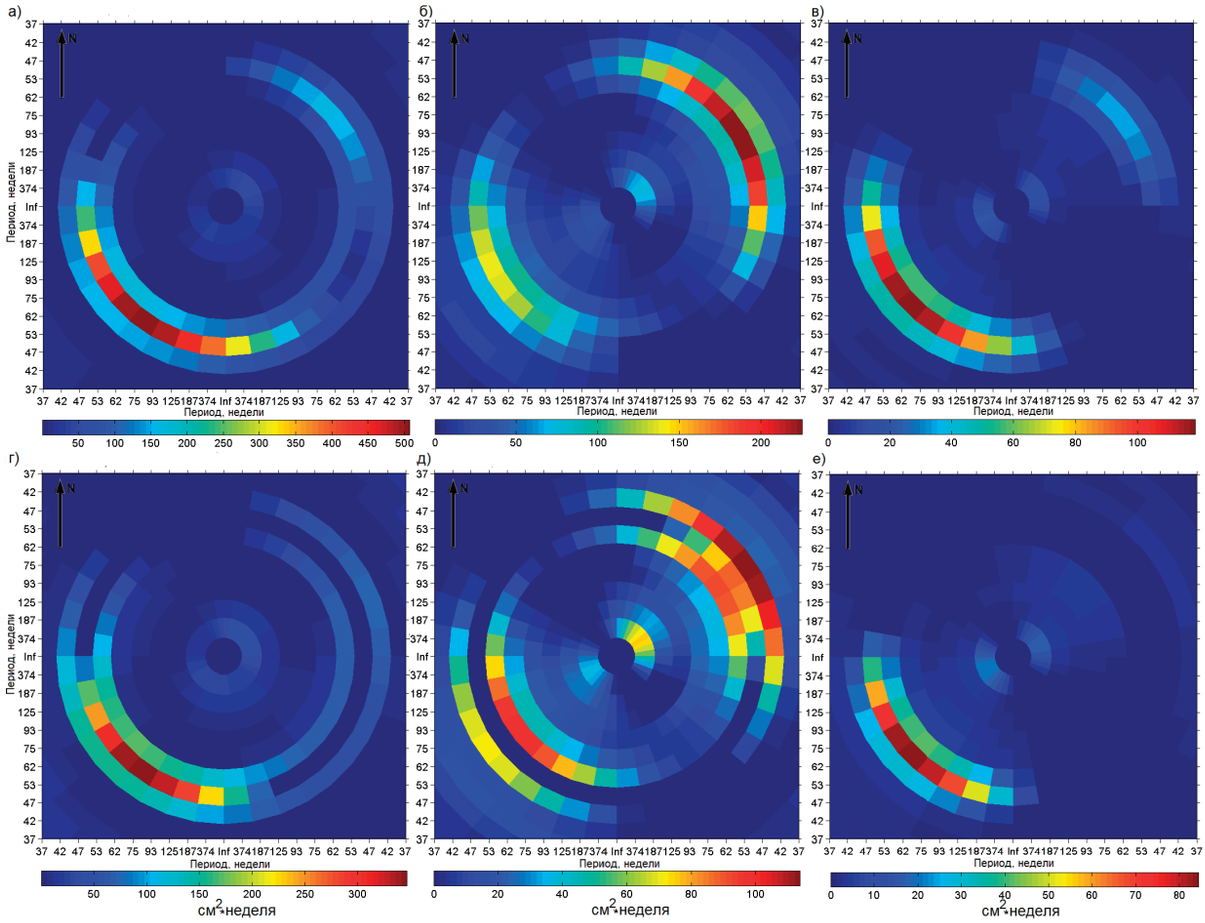

Рис. 3. Частотно-направленные спектры исходных данных (а, б, в) и демодулированных (г, д, е). Распределение энергии (цвет) по направлениям (румбы) и частотам (кольца) для областей: 37°–38° с.ш., 133°–135° в.д. (а, г); 39°–40° с.ш., 133°–135° в.д. (б, д); 42°–43° с.ш., 133°–135° в.д. (в, е)

Таким образом, нам представляется, что низкочастотные волновые возмущения в таком замкнутом бассейне, как Японское море, обуславливаются стояче-поступательной волной, в простейшем случае описываемой амплитудно-модулированными колебаниями. Они могут быть охарактеризованы частотно-направленным спектром модулированных по амплитуде сезонными колебаниями уровня вероятно анемобарического происхождения.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № 18.37.140.2014.

Литература

1. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
2. *Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О.* Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана. СПб.: СМИО-ПРЕСС, 2009. 309 с.
3. *Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Фукс В.Р.* О стояче-поступательных волнах Россби в море и океане // Вестн. С.-Петерб. ун-та. 2012. Сер. 7. Вып. 2. С. 91–103.
4. *Витязев В.В.* Вейвлет-анализ временных рядов. Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2001. 58 с.
5. *Гренджер К., Хатанака М.* Спектральный анализ временных рядов в экономике. М., 1972. 362 с.
6. *Зверева А.Е., Фукс В.Р.* Градиентно-вихревые волны в котловине Уллын Японского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 19–27
7. *Зверева А.Е., Фукс В.Р.* Конвергенция потоков в поле градиентно-вихревых волн в котловине Уллын Японского моря, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 25–33

8. *Полякова А.М.* Особенности действия атмосферной циркуляции над Японским морем в 2000–2010 гг. // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2013. Т. 1. С. 52–63.
9. *Свешников А.А.* Определение вероятностных характеристик трехмерного волнения моря // Изв. АН СССР. Отд. тех. наук. Механика и машиностроение. 1959. № 3. С. 32–41.
10. *Сеидов Д.Г.* Синергетика океанских процессов: Л.: Гидрометоиздат, 1989. 287 с.
11. *Смирнов Н.П. Воробьёв В.Н.* Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. СПб: РГГМУ, 2002. 121 с.
12. *Старр В.П.* Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 260 с.
13. *Юрасов Г.И., Яричин В.Г.* Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
14. *Choi B.J., Haidvogel D.B., Cho Y.K.* Nonseasonal sea level variations in the Japan/East Sea from satellite altimetry data // J. of Geophys. Res. 2004. Vol. 109. C12028.
15. *Hirose N., Ostrovskii A.G.* Quasi-biennial variability in the Japan Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. C12028. P. 14011–14027.
16. *Volkov D.L, Belonenko T.V., Foux V.R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. P. 738–743.

Spectral and wavelet analysis of the Japan/East Sea level anomalies

A.E. Zvereva

N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Saint Petersburg 199397, Russia
E-mail: Anastasia.eug.zvereva@gmail.com

In this paper, low-frequency oscillations of the Japan/East Sea level anomalies during 1992–2012 are investigated based on satellite altimetry data. Spectral analysis highlighted main fluctuation periods: 4, 2.5, 1 and 0.5 years. Meanwhile, wavelet analysis revealed a significant level of non-stationarity. The presence of non-linear energy fluxes between the oscillations of different frequencies is associated with the so-called "Kolmogorov cascade mechanism" from the large-scale to the small-scale movements, as well as with the phenomenon of "negative viscosity" in case of fluxes of the opposite direction. As the development of hypothesis on the wave nature of the low-frequency level oscillations of the Japan/East Sea, directed frequency spectral analysis has been applied to the altimetry data time series. The method allowed estimation of the low-frequency waves parameters on the annual scale and their propagation direction, defining them as the planetary waves and also showed complex spatial structure. These results are consistent with the hypothesis suggested earlier in (Zvereva, Foux, 2014, 2016) on the propagation of the standing-progressive planetary waves in the Japan/East Sea, which can be represented by the system of the nodal lines and Rossby waves propagating westward between them.

Keywords: Rossby waves, altimetry, standing-progressive waves, Japan/East Sea, spectral analysis, directed frequency spectrum

Accepted: 29.09.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-114-120

References

1. Astaf'eva N.M., Veivlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniya (Wavelet analysis: theory basics and application), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, Vol.166, No.11. pp. 1145–1170.
2. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Staritsyn D.K., Fuks V.R., Shilov I.O., *Izmenchivost' urovnya Severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Northwestern Pacific Ocean level variability), Saint-Petersburg: SMIO-PRESS, 2009, 309 p.
3. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Fuks V.R., O ctoyache-postupatel'nykh volnakh Rossbi v more i okeane (On standing-progressive waves in ocean), *Vestn. S.-Peterb. un-ta*, 2012, Vol. 7. No. 2. pp. 91–103.
4. Vityazev V.V., *Veivlet-analiz vremennykh ryadov* (Time series wavelet analysis), Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2001, 58 p.
5. Granger C., Hatanaka M., *Spektral'nyi analiz vremennykh ryadov v ekonomike* (Spectral analysis of economic time series), Moscow, 1972, 362 p.
6. Zvereva A.E., Fuks V.R., Gradientno-vikhrevye volny v kotlovine Ullyn Yaponskogo morya (Gradient-vorticity waves in the Japan/East Sea Ulleung basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11., No. 3., pp. 19–27

7. Zvereva A.E., Fuks V.R., Konvergentsiya potokov v pole gradientno-vikhrevykh voln v kotlovine Ullyn Yaponskogo moray (Fluxes convergence in gradient-vorticity waves field in the Japan/East Sea Tsushima/Ulleung basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2., pp. 25–33
8. Polyakova A.M., Osobennosti deistviya atmosfernoi tsirkulyatsii nad yaponskim morem v 2000–2010 gg. (Peculiarities of the atmospheric circulation effects over Japan/East Sa in 2000–2010), In: *Okeanologicheskie issledovaniya dal'nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Northwestern Pacific and Far East seas oceanographic researches), Vladivostok: Dal'nauka, 2013, Vol. 1, pp. 52–63.
9. Sveshnikov A.A., Opredelenie veroyatnostnykh kharakteristik trekhmernogo volneniya morya (Definition of the stochastic three-dimension sea wave field parameters), *Izv. AN SSSR. Otd. tekh. nauk. Mekhanika i mashinostroenie,* 1959, No. 3, pp. 32–41.
10. Seidov D.G., *Sinergetika okeanskikh protsessov (Oceanic processes synergy),* Leningrad: Gidrometoizdat, 1989, 287 p.
11. Smirnov N.P. Vorob'ev V.N., *Severo-Tikhookeanskoe kolebanie i dinamika klimata v severnoi chasti Tikhogo okeana* (North Pacific Oscillationd and climate dynamics), Saint-Petersburg: RGGMU, 2002, 121 p.
12. Starr V.P., *Fizika yavlenii s otritsatel'noi vyazkost'yu* (Physics of negative viscosity phenomena), Moscow: Mir, 1971, 176 p.
13. Yurasov G.I., Yarichin V.G., *Techeniya Yaponskogo morya* (Japan/East Sea currents), Vladivostok: DVO RAN, 1991, 176 p.
14. Choi B.J., Haidvogel D.B., Cho Y.K., Nonseasonal sea level variations in the Japan/East Sea from satellite altimetry data, *J. of Geophys. Res*., 2004, Vol. 109, C12028.
15. Hirose N., Ostrovskii A.G., Quasi-biennial variability in the Japan Sea, *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, C12028, pp. 14011–14027.
16. Volkov D.L, Belonenko T.V., Foux V.R., Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability, *Geophysical Research Letters,* 2013, Vol. 40, pp. 738–743.