

Прогноз среднегодового уровня Японского и Охотского морей по гидрофизическим и гидрометеорологическим предикторам¹

Д. К. Старицын, В. Р. Фукс²

Для оценки связи между изменчивостью среднегодовых значений уровня Японского и Охотского морей и индексами, отражающими динамику гидрофизических процессов, проведены корреляционный и взаимокорреляционный анализы. Делается предвычисление уровня с заблаговременностью от одного года до четырех лет. В качестве модели прогноза уровня использована модель линейной множественной регрессии.

Experiment in regression-based precalculation of sea level in the Japan Sea and in the Okhotsk Sea use hydrophysical and hydrometeorological predictors. *Dmitry K. Staritsyn, Viktor R. Foux, Saint-Petersburg State University Faculty of Geography and Geocology, Dept. of Oceanology.*

The relation between the variability of the average annual level fluctuations in the Japan Sea and in the Okhotsk Sea and the indexes, reflecting the dynamics of hydrophysical processes, is examined by means of auto- and inter-correlation analyses; regression forecasting equations are developed as well. Sea level magnitudes are predicted for advance time of one to four years. The sea level forecast model is the multiple linear regression.

Введение

Проблема оценки межгодовых колебаний уровня в отдельных регионах мирового океана в последние годы привлекает все большее внимание в связи с дискуссией о глобальном потеплении климата Земли.

Не вызывает сомнения, что изменчивость уровня моря – это отклик на воздействие целого набора геофизических процессов, в том числе водообмена с океаном через проливы. Количественная оценка вклада каждого из этих процессов в настоящее время затруднена из-за отсутствия репрезентативных наблюдений.

Важнейшими глобальными показателями климатических изменений в атмосфере и океане являются интегральные индексы атмосферной и океанической циркуляции. Сопоставив возмущения уровня с набором интегральных

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

² *Старицын Дмитрий Константинович* – доцент, кандидат географических наук; *Фукс Виктор Робертович* – профессор географического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, доктор географических наук.

индексов, можно оценить вклад того или иного процесса в изменчивость уровня, определить тенденцию и наиболее устойчивые связи с их глобальными изменениями.

Основной задачей работы является исследование зависимости колебаний уровня Японского и Охотского морей от изменчивости процессов глобальной атмосферной и океанической циркуляции с целью возможности предвычисления уровня этих морей с заблаговременностью от одного года до четырех лет.

В работе в качестве исходной информации использовались среднемесячные временные ряды интегральных индексов, отражающих динамику гидрофизических процессов и временные ряды уровня Японского и Охотского морей за период 1993–2009 гг., полученные по данным спутниковых альтиметрических измерений в пунктах, представленных на рис. 1.

Информация об уровне моря получена с сайта AVISO. Массив представляет собой комбинацию измерений трех спутников: Topex/Poseidon, JASON, ERS-1,2 (<http://las.aviso.oceanobs.com/las/servlets/dataset>) в пунктах, расположенных в узлах регулярной сетки с шагом 1×1 град. Рассматривались данные SLA (Sea Level Anomaly) аномалий уровня моря, полученные как отклонение высоты поверхности моря от среднего значения SST.

Для оценки связи между изменчивостью среднегодовых значений уровня Японского и Охотского морей и интегральными индексами проведены корреляционный и взаимокорреляционный анализы по стандартным методикам, а также получены регрессионные зависимости.

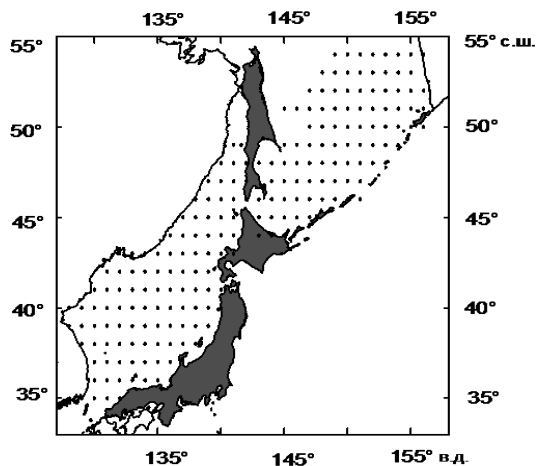


Рис. 1. Схема пунктов, в которых оценивались среднегодовые значения уровня по спутниковым данным

В качестве предикторов использовались следующий набор индексов:

1) NP – северо-тихоокеанский индекс определяется средневзвешенным по площади давлением над уровнем моря в регионе 30 с. ш. – 65 с. ш. и 160

в. д. – 140 з. д. в зимний период. Этот индекс, как показывают исследования [10], тесно связан с изменением давления в центре Алеутской депрессии.

2) PDO – индекс тихоокеанского декадного колебания температуры поверхности океана. Индекс определяется по температуре поверхности океана (ТПО) и рассчитывается как первая мода разложения аномалий ТПО на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) в северной нетропической части Тихого океана. Когда ТПО в зимнее время аномально холодная в центральных районах Северной части Тихого океана, а давление над уровнем моря ниже среднего для Тихого океана, то этот индекс имеет положительные значения, т. е. теплая фаза. Если наоборот, то отрицательные, т. е. холодная фаза. (<http://www.jisao.washington.edu/pdo/>);

3) WP – индекс низкочастотной изменчивости температуры воздуха в западной части Тихого океана (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>);

4) QBO – квазидвухлетнее колебание;

5) PNA – индекс низкочастотной изменчивости струйных потоков в северной части Тихого океана. Положительная фаза индекса PNA как правило, связана с развитием теплого сценария циркуляционных процессов (Эль-Ниньо), а отрицательная фаза обычно ассоциируется с холодным типом развития процессов (Ла-Нинья);

6) SOI – индекс Южного колебания (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Индекс SOI показывает отклонение разности атмосферного давления от среднего между островом Пасхи (или островом Таити) и городом Дарвин в Австралии. Отрицательные значения этого индекса означают, что установилась фаза Эль-Ниньо, положительные – фаза Ла-Нинья.

Помимо SOI, использовались также средние аномалии температуры поверхности воды тропической части Тихого океана. К ним относятся температурные индексы (SST):

Nino 1+2: $0^{\circ} - 10^{\circ}\text{S}$, $80^{\circ}\text{W} - 90^{\circ}\text{W}$,

Nino 4: $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$, $160^{\circ}\text{E} - 150^{\circ}\text{W}$, (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Положительные значения индексов Nino соответствуют фазе Эль-Ниньо, отрицательные – фазе Ла-Нинья;

7) MEI – многомерный индекс Эль-Ниньо (Index Multivariate El Niño Index), который содержит информацию не только о температуре поверхности моря, но и таких параметрах, как энергия ветра и атмосферное давление;

8) TNI – индекс баланса температуры между явлениями Эль-Ниньо и Ла-Ниньо;

9) СВЗ – индекс скорости вращения Земли (<http://www.iers.org/>);

10) Wolf – числа Вольфа.

В табл. 1 представлены частные коэффициенты корреляции между изменчивостью среднегодового уровня, осредненного по площади в различных регионах исследуемых морей и испытываемыми предикторами. Если выбрать в качестве порогового значения тесноты связи между переменными $r > 0,5$, то, как видно из табл. 1, такую величину имеет индекс PDO и числа Wolf для

Японского моря и индекс TNI для Охотского, где величина коэффициента корреляции превышает пороговое значение. Относительно высокая корреляция практически по всей акватории Охотского моря между колебаниями уровня и индексами TNI, характеризующими баланс температуры между Эль-Ниньо и Ла-Ниньо ($0,57 < r < 0,66$, см. табл. 1) свидетельствует о значительной роли этого явления в формировании изменчивости уровня Охотского моря. Таким образом, в большинстве случаев устойчивая связь при прямой синхронной корреляции между колебаниями уровня Японского и Охотского морей с другими предикторами не выявляется. Можно ожидать, что более тесная связь индексов существует на некотором фазовом сдвиге относительно зависимой переменной, т. е. уровня моря.

Для определения степени десинхронизации во времени колебаний уровня относительно изменчивости интегральных индексов был применен взаимно-корреляционный анализ. Результаты взаимно-корреляционного анализа уровня с предикторами, имеющими наиболее устойчивую связь, представлены в таблицах 2 и 3. В табл. 2–3 хорошо видно, что оценки взаимных коэффициентов корреляции в сравнении с коэффициентами синхронной корреляции (табл. 1) увеличиваются. Так, например, связь уровня Японского моря с числами Вольфа на сдвиге один год оказалась равной ($r = 0,73$), а уровня Охотского моря с индексом угловой скорости вращения Земли на сдвиге три года ($r = 0,82$) с числами Вольфа ($r = 0,81$) на фазовом сдвиге в три года. Высокая корреляция возмущений уровня с индексом солнечной активности свидетельствует о значительном вкладе в его изменчивость стерических эффектов. Достаточно очевидно, что для предвычисления среднегодовых колебаний уровня Японского и Охотского морей необходимо использовать выявленные индексы на максимальных фазовых сдвигах.

Таблица 1

Оценки парных коэффициентов корреляции между уровнем и индексами атмосферной и океанической циркуляции

Индексы	GIM	Nino1	Nino 4	PDO	PNA	SOI	WP	Ск. вр. 3.	Wolf	TNI	QBO	MEI
Японское море												
Юж. часть	-0,06	0,17	-0,21	-0,43	-0,02	0,21	0,32	0,31	0,56	0,29	0,09	-0,13
Цент. часть	-0,20	0,00	-0,25	-0,59	0,11	0,33	0,14	0,39	0,42	0,19	0,16	-0,30
Север. часть	-0,32	0,03	-0,35	-0,61	-0,15	0,36	0,14	0,27	0,40	0,29	0,02	-0,32
Татар. пролив	0,05	0,14	-0,14	-0,28	-0,29	0,23	-0,18	-0,01	0,34	0,20	0,29	-0,13
Все Япон. море	-0,15	0,09	-0,26	-0,54	-0,04	0,31	0,16	0,31	0,49	0,26	0,14	-0,24
Охотское море												
Юж. часть	0,19	0,38	-0,39	-0,15	-0,03	0,31	-0,14	-0,25	0,11	0,62	0,27	-0,07
Цент. часть	0,16	0,37	-0,46	-0,19	-0,02	0,29	0,02	-0,38	0,10	0,66	0,14	-0,08
Север. часть	0,23	0,37	-0,34	-0,01	-0,14	0,18	-0,09	-0,46	0,17	0,57	0,13	0,01
Все Охот. море	0,20	0,39	-0,41	-0,12	-0,07	0,27	-0,07	-0,38	0,13	0,64	0,18	-0,05

1. Предвычисление уровня Японского и Охотского морей методом множественной линейной регрессии

Таблица 2

Оценка связи и фазовые сдвиги между среднегодовым уровнем Японского моря и выбранными предикторами

Район	Предиктор	R_{max}	Фазовый сдвиг (годы)
Южная часть	TNI	0,68	1
	Wolf	0,73	-1
	PDO	-0,43	0
Центральная часть	NINO4	0,56	-3
	Wolf	0,53	-1
	Ск. вращ. Земли	0,4	-1
Северная часть	Wolf	0,62	-1
	TNI	0,7	1
	PDO	-0,61	0
Татарский пролив	TNI	0,5	1
	Wolf	0,54	-1
	WP	0,51	3

Таблица 3

Оценка связи и фазовые сдвиги между среднегодовым уровнем Охотского моря и выбранными предикторами

Район	Предиктор	R_{max}	Фазовый сдвиг, (годы)
Южная часть	Wolf	0,76	-3
	Ск. вращ. Земли	-0,67	2
	PDO	0,42	4
Центральная часть	Wolf	0,8	-3
	Ск. вращ. Земли	-0,75	2
	WP	0,3	-2
	PDO	0,48	4
Северная часть	Ск. вращ. Земли	-0,82	3
	Wolf	0,81	-3
	WP	0,4	-2
Все Охотское море	Ск. вращ. Земли	-0,78	2
	Wolf	0,82	-3
	WP	-0,36	-2
	PDO	0,48	4

1. Предвычисление уровня Японского и Охотского морей методом множественной линейной регрессии

В качестве модели прогноза уровня была испытана модель множественной линейной регрессии (МЛР). Методы множественного регрессионного анализа хорошо апробированы и широко применяются как для объективного

анализа зависимости различных гидрометеорологических характеристик, так и для прогноза метеорологических, гидрологических и геофизических величин [6, 7, 8, 9]. При использовании этого метода обычно предполагают, что зависимая переменная (предиктант) – Y – является функцией влияния набора независимых переменных (предикторов) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_M$. Тогда основное прогностическое уравнение линейной регрессии записывается в виде:

$$Y_i = b_0 + \sum_{j=1}^M b_j (x_{ij}) + e_i \quad (1),$$

где i – номер наблюдения из выборки значений длиной N ; j – номер независимой переменной x_j ($j = 1, 2, \dots, M$); b_0, b_1, \dots, b_M – коэффициенты линейной регрессии; x_i – значение j -й переменной; e – ошибка регрессии.

Вычисляется статистическая оценка коэффициентов регрессии S_E , основанная на минимизации дисперсии ошибок:

$$S_E = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2 \rightarrow \min,$$

где: y – наблюдаемое значение переменной, \tilde{y} – восстановленное значение переменной.

Коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_M рассчитываются с помощью метода наименьших квадратов, эффективность применения которого зависит от следующих условий:

- 1) ошибки регрессии должны иметь нулевое среднее;
- 2) независимые переменные не должны коррелировать между собой;
- 3) желательно нормальное распределение остатков.

При выполнении этих условий вычисление значений коэффициентов регрессии сводится к решению системы нормальных уравнений типа:

$$\begin{aligned} r_{11} b_{01} + r_{12} b_{02} + \dots + r_{1M} b_{0M} &= r_{01}; \\ r_{21} b_{01} + r_{22} b_{02} + \dots + r_{2M} b_{0M} &= r_{02}; \\ &\dots; \\ r_{M1} b_{01} + r_{M2} b_{02} + \dots + r_{MM} b_{0M} &= r_{0M}. \end{aligned} \quad (2)$$

Исходные данные при применении метода МЛР должны отвечать следующим требованиям:

- число членов ряда должно существенно превосходить число предикторов;
- ряд должен быть стационарным (в широком смысле);
- связь между предиктором и предиктантом должна быть линейной;

– между предикторами должны выполняться условия независимости (некоррелированности).

Следует отметить, что точных критериев определения коррелированности (мультиколлинеарности) не существует, однако есть некоторые эвристические методы по ее выделению [6]. Обычно на практике оценивают матрицу парных коэффициентов корреляции (r) между предикторами. Считается, что значения коэффициентов парной корреляции по абсолютной величине $r \geq 0,7$ указывают на наличие мультиколлинеарности.

1.1. Оценка надежности модели МЛР

При регрессионном анализе основным критерием эффективности является полный эмпирический коэффициент множественной корреляции R_0 , характеризующий связь между наблюдаемыми и вычисленными по уравнению регрессии величинами. Этот показатель вычисляется по формуле:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\bar{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y})^2}}$$

Величину $R_0^2 = RI$ называют коэффициентом детерминации [6], поскольку она является обобщением коэффициента корреляции $r^2(x,y)$ и пропорциональна доле дисперсии переменной y , описываемой данной моделью регрессии.

Оценка адекватности модели фактическим значениям осуществляется с помощью эмпирического критерия Фишера:

$$F = \frac{S_D}{S_E},$$

где $S_D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$, $S_E = \frac{1}{N-M-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$.

Если рассчитанная величина F превышает табличное значение F_m при заданном уровне значимости и степенях свободы $m_1 = M$ и $m_2 = N - M - 1$, то гипотезу об адекватности построенной модели можно считать оптимальной.

Наиболее «тонкой» проверкой адекватности модели является статистика Дарбина-Уотсана (коэффициент DW), позволяющая оценить степень автокорреляции остатков. Чем меньше автокорреляция остатков, тем выше качество регрессионной модели и численное значение коэффициента DW близко к величине $2 \cdot (1 - r(\tau))$, где $r(\tau)$ – выборочная автокорреляционная функция остатков. Идеальное значение статистики DW = 2 (автокорреляция отсутствует). Меньшая величина соответствует положительной корреляции остатков, большая – отрицательной.

1.2. Построение оптимальной модели МЛР

Наиболее эффективным методом построение прогностической модели МЛР считается пошаговый.

В пакете прикладных статистических программ (ППСП) «Statistica» предусмотрены следующие пошаговые алгоритмы:

- метод исключения переменных (Intercept);
- метод включения переменных;
- метод включения-исключения переменных (Forward stepwise).

При большом числе зависимых переменных в модели наиболее предпочтительным является метод включения-исключения переменных. Суть этого метода заключается в том, что на каждом шаге после проверки всех коэффициентов регрессии на значимость может быть исключена та переменная, которая имеет уровень значимости (p -level), превышающий пороговое значение. Причем такое исключение осуществляется вне зависимости от того, когда данный предиктор был включен в модель. Чаще всего причина исключения заключается в тех связях, которые существуют между этим и другими предикторами, испытываемыми в модели. Еще одна информативная характеристика модели – Std.Error, измеряемая в единицах измерения предиктанта.

2. Результаты статистического прогнозирования изменчивости уровня Японского и Охотского морей

В этом разделе представлены результаты прогнозирования по моделям пошаговой линейной множественной регрессии среднегодовых значений уровня Японского и Охотского морей.

2.1. Модель пошаговой регрессии среднегодового уровня Японского моря

Оценки качества модели и коэффициенты регрессии для предвычисления среднегодового уровня Японского моря демонстрируются в табл. 4. Как видно из таблицы, наибольший вклад в дисперсию изменчивости уровня Японского моря вносит индекс степени солнечной активности (Wolf), а, следовательно, межгодовые колебания уровня прежде всего зависят от стерических эффектов. Второй по величине вклад принадлежит индексу TNI, характеризующему баланс тепла между явлениями Эль-Ниньо и Ла-Ниньо [14]. Третий значимый фактор вносят процессы, характеризуемые индексом PNA. Выше уже отмечалось, что этот индекс связан с низкочастотной составляющей изменчивости климата в Северной внетропической зоне Тихого океана. Положительная фаза индекса PNA, как правило, связана с развитием теплого сценария циркуляционных процессов (Эль-Ниньо), а отрицательная фаза обычно ассоциируется с холодным типом развития процессов (Ла-Нинья). Четвертый по величине вклад в общую дисперсию возмущений уровня Японского моря вносит изменчивость угловой скорости вращения Земли (EARTH). Влияние флуктуации скорости вращения Земли на изменчивость синоптических процессов в атмосфере и вариации метеорологических характеристик

подтверждают многочисленные исследования [11, 12, 13]. Показано, что периоды ускорений вращения Земли совпадают с эпохами отрицательных аномалий частоты появления типа С атмосферной циркуляции и положительных аномалий комбинированного типа (W + E) атмосферной циркуляции [11]. В эти периоды увеличивается масса льда в Антарктиде, ослабевает интенсивность зональной циркуляции, повышается темп роста температуры Северного полушария, преобладают положительные аномалии глобальной облачности. Не вызывает сомнения, что эти факторы оказывают влияние на колебания уровня Мирового океана.

Таблица 4

Статистико-вероятностные оценки модели линейной множественной регрессии уровня Японского моря с заблаговременностью четыре года

$R_0 = 0,95$	$RI = 0,89$	$F_{\text{таб.}} = 4,8$	$F = 16,9$	$p < 0,00058$		
Std.Error of estimate: 0,733		DW = 1,7				
	BETA	St. Err. of BETA	b	St. Err. of B	t-student	p-level
Intercept			-80,92	67,7	-1,195	0,266
WOLF	-0,973	0,154	-0,047	0,007	-6,325	0,000
TNI	0,456	0,136	0,511	0,153	3,351	0,010
NA	0,209	0,125	1,150	0,690	1,667	0,134
Earth	0,198	0,159	0,562	0,452	1,243	0,249

2

Подставляя вычисленные коэффициенты, получим искомое уравнение линейной множественной регрессии в виде:

$$Y(t_{\text{год}}) = -80,924 - 0,047x_1 + 0,511x_2 + 1,150x_3 + 0,562x_4$$

где: x_1 – число Wolf, x_2 – значение индекса TNI, x_3 – значение индекса PNA, x_4 – скорости вращения Земли (Earth)

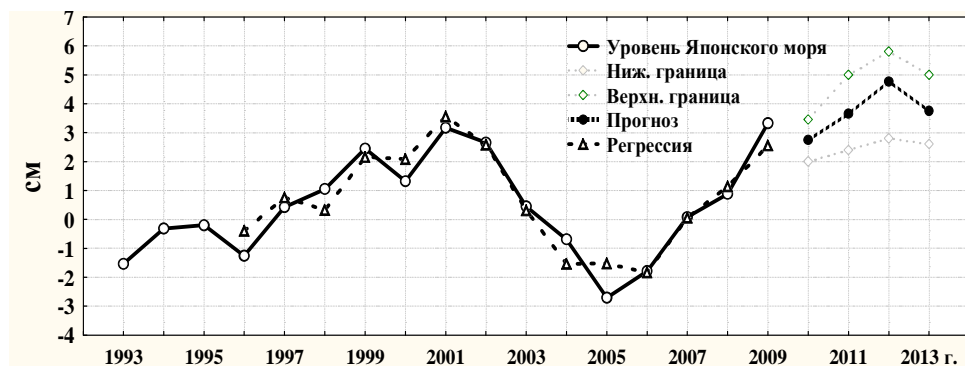


Рис. 2. Регрессия, фактическая и предвычисленная с помощью модели кривые временного хода уровня Японского моря

На рис. 2 представлены фактическая регрессия и предвычисленные до 2013 г. кривые временного хода уровня Японского моря. Видно, что до

2012 г. можно ожидать тенденцию увеличения, после чего наступит период снижения уровня.

2.2. Модель пошаговой множественной регрессии среднегодового уровня Охотского моря

В табл. 3 приведены основные статистические характеристики модели среднегодовых значений уровня Охотского моря. Из них следует, что при прогнозе среднегодового уровня с трех-, четырехлетней заблаговременностью наиболее информативными независимыми переменными следует считать: числа Вольфа, скорость вращения Земли, индекс квазидвухлетнего колебания (QBO) и индекс PNA, связанный с низкочастотной изменчивостью струйных потоков в северной части Тихого океана.

Таблица 5

Статистико-вероятностные оценки модели линейной множественной регрессии уровня Охотского моря с заблаговременностью четыре года

R ₀ = 0,91		RI = 0,83		F _{таб.} = 4,8		
F = 9,9 p < 0,0034		Std.Error of estimate: 0,929		DW = 1,3		
	BETA	St. Err. of BETA	b	St. Err. of B	t-student	p-level
Intercpt			157,93	79,1	1,997	0,081
Wolf	-0,631	0,180	-0,031	0,009	-3,506	0,008
Earth	-0,366	0,184	-1,048	0,528	-1,983	0,083
QBO	-0,219	0,154	-0,036	0,025	-1,424	0,192
PNA	0,177	0,152	0,980	0,843	1,163	0,278

Для этой модели оценочные критерии качества регрессии между фактической и вычисленной кривой хода уровня довольно устойчивые (см. табл. 5) – общий коэффициент множественной регрессии R₀ = 0,91, коэффициента детерминации RI = 0,83, оценка критерия согласия Фишера F = 9,9 (при F_T = 4,8, для α = 0,01), что указывает на адекватность выбранной модели.

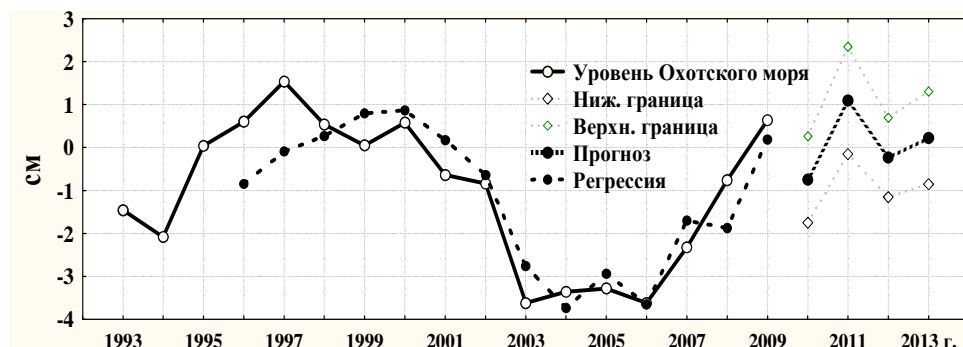


Рис. 3. Регрессия, фактическая и предвычисленная кривые временного хода уровня Охотского моря

Уравнение линейной множественной регрессии для вычисления уровня в Охотском море имеет следующий вид:

$$Y(t_{\text{год}}) = 157,928 - 0,031x_1 - 1,048x_2 - 0,036x_3 + 0,980x_4,$$

где: x_1 – число Wolf, x_2 – скорости вращения Земли (Earth), x_3 – значение индекса QBO, x_4 – значение индекса PNA.

На рис. 3 представлены результаты расчета уровня по модели линейной множественной регрессии. Видно хорошее соответствие между фактической и вычисленной кривой. Прогностическая кривая указывает на снижение среднегодового уровня в 2010 г., затем его рост в 2011 г., после чего, вероятно, вновь наступит фаза снижения уровня.

Заключение

Основные результаты выполненной работы сводятся к следующему:

1. Получены оценки частных коэффициентов корреляции между колебаниями среднегодового уровня Японского и Охотского морей и индексами атмосферной и океанической циркуляции.

2. Для наиболее коррелированных процессов с помощью взаимного корреляционного анализа определена степень десинхронизации и оценена эффективная заблаговременность прогнозов возмущений уровня.

3. На основе множественного регрессионного анализа получены зависимости возмущений уровня от геофизических предикторов.

4. Колебания среднегодовых значений уровня Японского и Охотского морей удовлетворительно описываются статистико-вероятностными моделями множественной линейной регрессии.

5. Модели множественной регрессии позволили выявить статистические (и физические) значимые связи, по которым предвычислен уровень Японского и Охотского морей с четырехлетней заблаговременностью.

6. Статистические оценки качества регрессионных моделей для предвычисления среднегодового уровня свидетельствуют об их удовлетворительном соответствии с фактическим данным. Наиболее устойчивые оценки получены для Японского моря ($R_0 = 0,95$). В целом прогнозируются увеличение уровня Японского моря.

7. Изменчивость среднегодовых значений уровня Японского и Охотского морей в значительной степени обусловлена стерической составляющей.

8. В связи с неустойчивостью гидрометеорологических факторов, определяющих многолетнюю динамику уровня, регрессионные зависимости должны постоянно адаптироваться к новым условиям, т. е. по мере поступления новой информации о предиктантах и предикторах должны пересчитываться коэффициенты регрессии, определяться оптимальный список предикторов и, таким образом, должно быть получено новое уточненное уравнение множественной регрессии.

Литература

1. Miller L. and Douglas B. C. Mass and volume contributions to twentieth century global sea level rise // *Nature*. V. 428. 25 March 2004. – P. 406–409.
2. Nerem R. S., Leuliette E. W., Chambers D. P. An Integrated Study of Sea Level Change Using Altimetry, Gravity, and In Situ Measurements // *Geophys. Res. Abstr.* 2005. Vol. 7. 09831, Sref-ID: 1607–7962.
3. Cazenave, A., Nerem R. S. Present-day sea level change: Observations and causes // *Rev. Geophys.* 2004. V. 42. N 3. – P. 1–20.
4. Nerem R. S., Chambers D. P., Leuliette E. W., Mitchum G. T. Satellite Measurements of Sea level Change: Where have been and where are we going. / ESA Portal. Earthnet online. Дата обновления: 07.10.2003. URL: <http://earth.esa.int/cgi-bin/confalt15y.pl>.
5. Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р. Изменчивость уровня Японского и Охотского морей по данным спутниковых альтиметрических измерений // *Дальневосточные моря России: в 4 кн.* / Гл. ред. В. А. Акуличев. – Кн. 1: *Океанологические исследования* / Отв. ред. В. Б. Лобанов, В. А. Лучин. – М.: Наука, 2007. – С. 184–231.
6. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. *Прикладная статистика и основы эконометрики.* – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
7. Алексеев Г. А. *Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей.* – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 363 с.
8. Гандин Л. С. *Объективный анализ метеорологических полей.* – Л.: Гидрометеоздат, 1963. – 220 с.
9. Снайдер В. М. Некоторые возможности использования многомерного анализа в гидрологических исследованиях // *Электронные вычислительные машины в гидрологии.* – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – С. 43–58.
10. Смирнов Н. П., Воробьев В. Н. Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана, РГГМУ. – СПб., 2002.
11. Кондратович К. В., Куликова Л. А., Вершовский М. Г. Антициклонические центры действия атмосферы и вариации скорости суточного вращения Земли // *Вопросы промысловой океанологии.* – Вып. 3. – М.: изд-во ВНИРО, 2006. – С. 31–43.
12. Сидоренков Н. С. *Атмосферные процессы и вращение Земли.* – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – С. 7–8.
13. Salstein D. A., Rosen R. D. Earth rotation as a proxy for interannual variability in atmospheric circulation, 1860–present. // *J. of Clim. and Appl. Meteor.* – 1986. – Vol. 25. – P. 1870–1871.
14. Trenberth K. E. and David P. S. Indices of El Niño evolution *J. Climate*, 14. – P. 1697–1701.