

РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНЕГОДОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ УКРАИНЫ

Установлено, что многолетние изменения гидрометеорологического режима черноморской прибрежной зоны Украины за 1945-2009 гг. характеризуются значимыми линейными трендами (положительными для температур воздуха и воды, годовых сумм осадков и среднего уровня моря; отрицательными для скорости ветра и солёности морской воды). Для среднегодовых величин отклонений от трендов получены значимые регрессионные зависимости: температуры воды от температуры воздуха; солёности от уровня моря; уровня моря от суммарного расхода рек, осадков и температуры воды. Проверку полученных регрессионных уравнений выполнено на независимых данных за 2010-2013 гг.

Ключевые слова: скорость ветра, температура воздуха и воды, атмосферные осадки, уровень моря, солёность морской воды, линейные тренды, регрессионный анализ.

Введение

Многолетние и межгодовые изменения гидрометеорологических условий (ГМУ) черноморской прибрежной зоны Украины могут быть описаны рядами среднегодовых величин скорости ветра, температуры воздуха и воды, атмосферных осадков, уровня моря и солёности морской воды [1-6]. В работе [2] показано, что на межгодовую и десятилетнюю (декадную) изменчивость перечисленных показателей преимущественное влияние оказывают внешние для региона факторы (за исключением солёности, где значимый вклад вносят местные условия). Поэтому для характеристики ГМУ всего побережья в целом могут быть использованы средние значения среднегодовых величин, полученные по данным ряда репрезентативных станций побережья Крыма и северо-западной части Чёрного моря. Анализ матрицы взаимной корреляции элементов ГМУ указывает на наличие значимых корреляционных связей между некоторыми из них [3]. Однако, часть дисперсии, объясняемой этими связями, приходится на положительные или отрицательные линейные тренды, природа и характер которых могут различаться у разных показателей. Для корректной оценки регрессионных уравнений, имеющих определённый физический смысл, необходимо разделить компоненты трендов и межгодовых флуктуаций гидрометеорологических величин. Такого рода зависимости могут быть полезны для восстановления пропущенных из-за недостатков в наблюдениях значений или прогноза отдельных показателей

(например – гидрологических) по известным или уже спрогнозированным величинам (например – метеорологическим).

Работа ставит своей целью исследование трендов и взаимных связей отклонений от трендов среднегодовых значений элементов гидрометеорологического режима украинской части черноморского побережья в целом – от восточного Крыма до устья р. Дунай.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений морских гидрометстанций Украины, расположенных на побережье Чёрного моря: Приморское, Одесса, Хорлы, Евпатория, Севастополь, Херсонесский маяк, Ялта и Феодосия [2-4]. Построены временные ряды среднегодовых значений скорости ветра (W , м/с), температуры воздуха (T_A , °С) и воды (T_W , °С), уровня моря (SL , см) и солёности (S , ‰), а также годовых сумм атмосферных осадков (PR , мм) за период 1945-2009 гг. (для солёности – за 1952-2009 гг.), осреднённых для черноморского побережья Украины. В дополнение к перечисленным, использовался ряд среднегодовых значений суммарного расхода рек Дуная, Днепра и Южного Буга (RD , м³/с), построенный по данным наблюдений на замыкающих створах этих рек (Рени, Каховская ГЭС и Александровск соответственно). В качестве независимых (проверочных) значений использованы аналогичные данные за 2010-2013 гг.

Анализ выполнялся посредством методов

парной и множественной линейной регрессии, реализованных в пакете статистического анализа PAST [7] (последняя версия программы – <http://folk.uio.no/ohammer/past>). На первом этапе оценивались коэффициенты линейных трендов, т.е. уравнения зависимости среднегодовых гидрометеорологических величин от времени за весь указанный период, а также статистическая значимость трендов. Затем для отклонений от трендов выполнен поиск оптимальных уравнений взаимной линейной регрессии различных элементов режима.

Анализ значимости коэффициентов регрессии, в том числе и наклона трендов, выполнялся посредством критериев Стьюдента и Фишера, а тест на сериальную некоррелированность остатков (отклонений от тренда) – с помощью критерия Дербина-Ватсона. Эти процедуры в применении к временным рядам элементов морского гидрометеорологического режима подробно изложены в монографии [5].

Анализ и обсуждение результатов

В табл. 1 сведены уравнения линейных трендов (X – год) для всех перечисленных рядов годовых показателей ГМУ черноморского побережья Украины. Из всех сопутствующих параметров регрессии приведены только коэффициенты детерминации уравнений (R^2), как наиболее наглядно характеризующие долю суммарной дисперсии, объясняемой зависимостью.

Таблица 1

Уравнения линейных трендов средних элементов гидрометеорологического режима черноморского побережья Украины за 1945-2009 гг. (для солёности 1952-2009 гг.)

Показатель	Уравнение тренда	R^2
Скорость ветра, м/с	$W = -0,0241 * X + 51,944$	0,869
Температура воздуха, °С	$TA = 0,0155 * X - 18,761$	0,133
Температура воды, °С	$TW = 0,0134 * X - 13,142$	0,109
Атм. осадки (сумма), мм	$PR = 1,7959 * X - 3095,6$	0,133
Уровень моря, см	$SL = 0,2143 * X + 57,257$	0,372
Солёность, ‰	$S = -0,0148 * X + 45,628$	0,389
Расход крупных рек, м ³ /с	$RD = 8,889 * X - 9605,1$	0,015

Первые шесть уравнений трендов в табл. 1 имеют коэффициенты наклона, значимые с вероятностью, намного превышающей принятый

в климатологии порог 95 %. Тренд расхода рек получился незначимым. Все ряды остатков (отклонений от тренда) удовлетворяют тесту на сериальную некоррелированность, т.е. последующий регрессионный анализ может выполняться по стандартным статистическим процедурам.

Наиболее тесно коррелированными на масштабе межгодовой изменчивости являются величины температуры воды и воздуха в прибрежной зоне. Зависимость между ними с вероятностью практически 100 % описывается уравнением регрессии (рис. 1а):

$$TW = 0,8916 * TA \quad (1)$$

при коэффициентах корреляции $R = 0,926$ и детерминации $R^2 = 0,858$. Среднеквадратическая ошибка оценки (Δ) температуры воды по уравнению (1) составляет $0,274$ °С.

Для солёности значимой (с вероятностью около 100 %) оказалась только связь с уровнем моря (рис. 1б):

$$S = -0,0319 * SL + 0,0296 \quad (2)$$

при $R = -0,589$; $R^2 = 0,347$; $\Delta = 0,24$ ‰.

В свою очередь, уровень моря наилучшим образом аппроксимируется уравнением множественной регрессии вида

$$SL = a * RD + b * PR + c * TW + d, \quad (3)$$

где a , b , c – коэффициенты регрессии (табл. 2). Константа d в уравнении (3) получилась практически нулевой. Множественные коэффициенты $R = 0,854$; $R^2 = 0,728$. Отношение Фишера $F = 54,531$, что определило значимость множественной статистической связи на уровне 100 %.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения регрессии (3) и их статистические параметры

Переменная	Коэфф. регрессии	Ср.-кв. ошибка	t	p	Частный R^2
RD	0,0025	0,00028	8,931	0,0000	0,6176
PR	0,0128	0,0044	2,908	0,0051	0,2406
TW	1,9821	0,4946	4,008	0,0002	0,1628

Из табл. 2 видно, что значения t-статистики Стьюдента (отношение величины коэффициента к среднеквадратической ошибке ее оценки) для всех коэффициентов регрессии определяют их высокую значимость (p – вероятность отсутствия линейной зависимости, $(1-p) * 100$ – значимость в процентах). Частные коэффициенты детерминации указывают долю дисперсии, объясняемую линейной связью с данной переменной при фиксированных значениях остальных перемен-

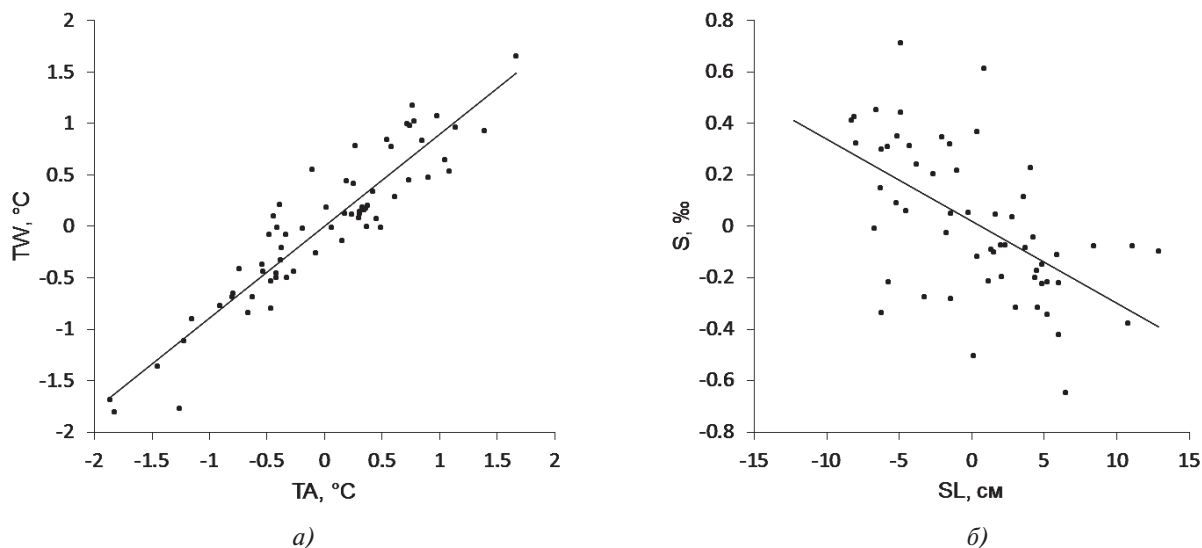


Рис. 1. Регрессионные зависимости отклонений от трендов температуры воды и температуры воздуха (а); солености и уровня моря (б)

ных. Ошибка оценки уровня по уравнению (3) $\Delta = 2,742$ см. Сопоставление отклонений уровня по данным измерений с оценками по уравнению (3) обнаруживает увеличение недооценки уровня с ростом абсолютной величины отклонений (рис. 2). Коэффициент наклона прямой линии на этом рисунке численно равен доле дисперсии отклонений уровня, объясняемой уравнением регрессии (3). Полученный результат имеет очевидный физический смысл, соответствующий представлениям о природе межгодовых вариаций среднего уровня моря в прибрежной зоне Украины. Согласно (3) и табл. 2, в наибольшей степени они определяются вариациями суммарного стока

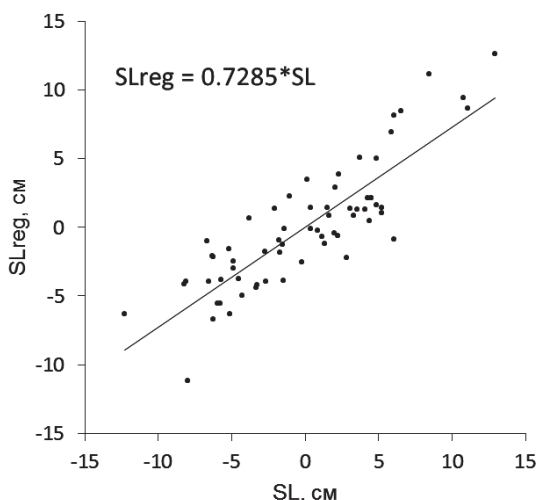


Рис. 2. Сопоставление отклонений уровня моря по данным измерений и по уравнению регрессии (SLreg)

рек Дуная, Днепра и Ю. Буга. Заметный вклад вносят также вариации годовых сумм осадков над прибрежными районами. Межгодовые колебания температуры морской воды тоже значительно проявляются в структуре и параметрах зависимости (3), отражая наличие стерических изменений уровня, связанных с термическим расширением (сжатием) толщины деятельного слоя моря [5]. Видимо, оставшиеся 27% дисперсии межгодовых вариаций уровня моря объясняются испарением с поверхности моря в целом и водообменом через проливы Босфор и Керченский, данные о которых не учтены регрессионной зависимостью.

Качество расчета (прогноза) среднегодовых отклонений от трендов по уравнениям (1) - (3) оценивалось с помощью независимых данных за 2010-2013 гг. Предварительно из среднегодовых значений вычитались значения трендов (табл. 1), затем производились оценки величин по уравнениям регрессии (Y_{reg}) и их отклонений от данных, полученных по наблюдениям ($Y - Y_{reg}$). Эти отклонения можно сравнить с величинами среднеквадратических отклонений (СКО) от трендов и среднеквадратическими ошибками Δ уравнений регрессии, полученных по данным до 2009 г. включительно (табл. 3).

Можно сделать вывод (табл. 3) об удовлетворительном результате тестирования уравнений (1) и (3) на независимом материале, в то время как оценки солености по уравнению (2) показывают систематическое смещение, в среднем, на 0,49 ‰ и превышают по модулю не только величину ошибки уравнения регрессии (2), но и естественную изменчивость отклонений от

Отклонения среднегодовых величин от регрессионных оценок за годы, не вошедшие в исходные ряды показателей ГМУ

Показатель	СКО от тренда	Δ	Отклонения Y-Ŷreg			
			2010	2011	2012	2013
Температура воды, °С	0,72	0,27	0,39	0,20	0,07	-0,30
Соленость воды, ‰	0,31	0,24	-0,33	-0,48	-0,75	-0,40
Уровень моря, см	5,26	2,74	0,46	3,83	-5,02	2,49

тренда. Это может означать, что в последние годы характер тренда солености изменился (скорость многолетнего распреснения прибрежных вод [5] увеличилась), либо качество наблюдений существенно ухудшилось (например, из-за недостатка нормальной воды на станциях).

Выводы

1. Установлено, что многолетние изменения элементов ГМУ черноморской прибрежной зоны Украины за 1945-2009 гг. характеризуются значимыми линейными трендами (положительными для температур воздуха и воды, годовых сумм осадков и среднего уровня моря; отрицательными для скорости ветра и солености морской воды). Тренд суммарного среднегодового расхода рек Дуная, Днепра и Южного Буга за послевоенный период оказался незначимым.

2. Для среднегодовых величин отклонений от трендов за 1945-2009 гг. получены значимые регрессионные зависимости: температуры воды от температуры воздуха; солености от уровня моря; уровня моря от суммарного расхода рек, осадков и температуры воды.

3. Проверка полученных регрессионных уравнений на независимых данных за 2010-2013 гг. показала, что зависимости температуры воды и уровня моря могут использоваться для расчета (прогноза) этих элементов ГМУ по известным значениям аргументов. Зависимость солености от уровня моря в силу низкого коэффициента корреляции и значительных ошибок расчета по независимым данным может быть рекомендована лишь для ориентировочных оценок.

Результаты работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях по морской климатологии черноморского побережья Украины, а также при сценарных оценках элементов гидрологического режима.

* *

1. *Ильин Ю.П.* Климатические изменения гидрометеорологических условий Черного моря // Глобальные и региональные изменения климата. – К.: Ника-Центр, 2011. – С. 247-254.
2. *Ильин Ю.П.* Вклад региональных и глобальных факторов в межгодовую изменчивость гидрометеорологических условий прибрежной зоны Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 26. Т. 1. – С. 117-122.
3. *Ильин Ю.П.* Основные факторы и классы морских гидрометеорологических условий Черноморского побережья Украины на масштабах десятилетней и межгодовой изменчивости. – Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2013. – Вып. 265. – С. 66-77.
4. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н.* Климатические изменения гидрометеорологического режима северного и восточного побережий Чёрного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 25. – С. 157-169.
5. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Черное море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – 421 с.
6. *Ilyin Y.P.* Observed long-term changes in the Black Sea physical system and their possible environmental impacts // Climate forcing and its impact on the Black Sea marine biota. №39 in CIESM workshop monographs / F. Bianchi (ed.). – Monaco: CIESM, 2010. – Pp. 35-44.
7. *Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D.* PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. – 2001. – 4(1). – 9 p. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

Ю.П. Ільїн

Регресійні залежності середньорічних показників гідрометеорологічних умов чорноморського узбережжя України

Установлено, що багаторічні зміни гідрометеорологічного режиму чорноморської прибережної смуги України за 1945-2009 рр. характеризуються значущими лінійними трендами (позитивними для температур повітря й води, річних сум опадів і середнього рівня моря; негативними – для швидкості вітру й солоності морської води). Для середньорічних величин відхилень від трендів отримано значущі регресійні залежності: температури води від температури повітря; солоності від рівня моря; рівня моря від сумарних витрат річок, опадів і температури води. Перевірку отриманих регресійних рівнянь виконано на незалежних даних за 2010-2013 рр.

Ключові слова: швидкість вітру, температура повітря й води, атмосферні опади, рівень моря, солоність морської води, лінійні тренди, регресійний аналіз.

Y.P. Ilyin

Regression relations for annual indices of the Ukrainian Black Sea coast hydro-meteorological conditions

It is stated that long-term changes of the Ukrainian Black Sea coastal zone hydro-meteorological conditions for 1945-2009 years are characterized by significant linear trends (positive for air and water temperatures, annual precipitation sums and sea level; negative for wind speed and water salinity). For the annual deviations from trends, significant regression dependencies were obtained: water temperature on air temperature; water salinity on sea level; sea level on summary rivers discharge, precipitations and water temperature. Testing of regression equations was performed by means independent data for 2010-2013 years.

Keywords: wind velocity, air temperature, atmospheric precipitations, sea level, marine water temperature and salinity, linear trends, regression analysis.

УДК 556.282.2

В.Г. Симов

РЕЧНОЙ СТОК ВОДЫ В ЧЕРНОЕ МОРЕ

Приведены результаты расчетов среднемесячного и годового притока речных вод в Черное море за 1921-2012 гг., полученные с помощью эмпирических связей с суммарным стоком рек Дуная и Днепра. Исследованы межгодовые и внутригодовые изменения речного стока в море. Определены тренды изменения годового и сезонного стока, а также уровня моря. Подтверждено совместное воздействие климата и антропогенного фактора на изменение речного стока в Черное море.

Ключевые слова: сток воды, межгодовая и сезонная изменчивость, тренды, уровень моря.

Речной сток воды в Черное море является важнейшей режимообразующей составляющей водного баланса [1, 2]. Поэтому определению его величины и многолетней изменчивости с давних пор уделялось много внимания. Детальная оценка стока в море за 1923-85 гг. впервые опубликована в [1]. Однако, как в указанной работе, так и в публикациях других отечественных и зарубежных авторов, результаты которых обобщены в [3], оценка величины годового притока речных вод в море и тенденции его многолетних изменений сильно отличаются. Так, например, норма годового притока воды в море по разным оценкам изменяется от 287 до 480 км³ и требует уточнения. Однако использовать метод, разработанный Э.Н. Альтманом [1], оказалось невозможно, т.к. прекратилось поступление

данных о стоке воды многих притоков Черного моря, протекающих по территории смежных стран. Поэтому для уточнения данных с учетом наблюдений по 2012 г. использован косвенный метод [2], основанный на привлечении эмпирических зависимостей между суммарным стоком рек Дуная и Днепра с общим притоком речных вод в море. В дополнение к указанному методу здесь приведены также уравнения связи (табл.1) для месячных величин стока в море. Эти зависимости могут быть использованы для расчетов за отдельные месяцы при наличии сведений о стоке рек Дуная и Днепра. Высокие коэффициенты аппроксимации зависимостей показывают также возможность использовать упрощенный способ определения месячных величин притока в море путем умножения величины годового сто-