УДК 556.131.1.048(261.24) doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-68-82

ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ИСПАРЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ПЕРИОДАХ ОСРЕДНЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ЮЖНОЙ БАЛТИКЕ

А.С. Аверкиев[1], В.Ф. Дубравин[2]

[1] Российский гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, asav@rshu.ru
[2] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

На основании длительных и надежных рядов наблюдений (2002—2016 гг.) на станциях в Южной Балтике дана количественная оценка влияния осреднения на рассчитанные значения потока влаги в случае непосредственного расчета по данным срочных наблюдений и в случае расчета по осредненным данным. Получены коэффициенты для коррекции значений испарения, рассчитанных по осредненным значениям гидрометеорологических параметров.

Ключевые слова: испарение, поток влаги, осреднение, гидрометеорологические параметры, Балтийское море.

CALCULATION ACCURACY OF EVAPORATION AT DIFFERENT AVERAGING PERIODS BY OBSERVATION DATA IN THE SOUTHERNBALTIC

A.S. Averkiev[1], V.F. Dubravin[2]

[1] Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia
[2] Institute of Oceanology P.P. Shirshov RAS, Moscow, Russia

The evaporation or moisture flow in the boundary layer is one of important components in the ocean-atmosphere interaction system. The most commonly used formulas for calculating evaporation include standard hydrometeorological parameters — atmospheric pressure, wind speed, drop of humidity, and height, at which measurements are made, and the exchange rate of moisture, which also depends on these parameters. The correct method is to calculate moisture flow based on current or hourly parameter values and then average the flow values for the required period: day, month or year. In the absence of current data of observation parameters, flow values should be calculated based on averaged parameter values. In this case, the calculated values of evaporation strongly depend on the method and the averaging period. Using the example of rather long observation series (2002—2016) at stations in the Southern Baltic, a quantitative assessment of the effect of averaging on the calculated values of the moisture flow both for direct calculation from the current observation data and for averaged data is made. The probable explanations are given for a significant variation in the calculated values of evaporation in the Baltic Sea by different authors. The coefficients for the correction of evaporation values obtained from the averaged values of hydrometeorological parameters are calculated. It is shown that averaging the parameters per day is acceptable with almost no loss of accuracy (error no more than 2-4 %). Averaging the values of hydrometeorological parameters over the period of a month leads to an underestimation of the calculated evaporation values by 20-30 %. When averaging over a period of about a year, the error increases to 30-35 %. The conclusions and correction coefficients are valid for calculations of evaporation in the Baltic Sea and can be used in other areas of middle and high latitudes,

where the evaporation values do not differ by orders of magnitude (tropics, equator, zones of significant variability of environmental parameters).

Keywords: evaporation, moisture flow, averaging, hydrometeorological parameters, Baltic Sea.

For citation: *Averkiev A.S., Dubravin V.F.* Accuracy of Evaporation calculation at Different Periods of Averaging by Observation Data in Southern Baltica. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 68—82. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-68-82

Введение

В системе взаимодействия океана и атмосферы большая роль принадлежит круговороту воды — влагообороту. Влагооборот, помимо собственно значимости, обеспечивает круговорот тепла. Совместно с общей циркуляцией атмосферы эти процессы формируют климат Земли.

Основу влагооборота составляет обмен пресными водами в результате материкового стока (R_Σ), осадков (Pr) и испарения (E). В отличие от измерений величин R_Σ и Pr, прямые измерения испарения (E) или потока влаги (E_v) в открытом море (океане) трудновыполнимы и производятся редко. Одним из косвенных методов измерения этих величин является аэродинамический: турбулентные потоки влаги (а также потоки тепла и импульса) выражаются через значения характеристик на стандартном уровне измерений, т. е. используются так называемые балк-формулы. Как правило, сравниваются значения на высоте 10 м и на поверхности моря. Обоснование этого метода и анализ работ по физическим основам параметризаций приводятся, например, в [1].

В последнее время появились модели (см., например, [2]), в которых сделана попытка улучшить классический балк-метод путем учета дополнительной информации о солнечной (коротковолновой и длинноволновой) радиации и состоянии поверхности моря (ее шероховатости, обусловленной волнением). Очевидно, что учет дополнительной информации несколько улучшает полученные для потоков результаты, но, во-первых, это усложняет расчеты, а во-вторых, и это главное, модель используется только для расчетов по данным срочных наблюдений и, по-видимому, непригодна для исследования долгопериодной изменчивости потоков тепла и влаги (с использованием метеоданных с дискретностью месяц или год).

По мнению авторов, при расчете потов тепла, влаги и импульса в Северной Атлантике по средним многолетним месячным значениям гидрометеорологических величин предпочтение следует отдавать методике С.К. Гулева [1, 3]. Такие расчеты для Балтийского моря не производились. Поэтому в данной работе подход С.К. Гулева и соавторов использован для акватории Южной Балтики, для которой имеются данные достаточно продолжительных гидрометеорологических наблюдений (2002—2016 гг.) на автоматических морских станциях с дискретностью 1 ч. Эти ряды уникальны по продолжительности и дискретности, и для открытого моря в других частях Балтики подобных рядов нет.

Сведения о потоках тепла и влаги с различным разрешением по времени и пространству можно найти в некоторых базах данных. Однако в большинстве

случаев они получены методами реанализа и качество и дискретность исходных гидрометеорологических данных, по которым они рассчитаны, неизвестны [4]. Поэтому такие сведения о потоках на поверхности раздела вода — воздух требуют тщательной проверки на основе надежных данных наблюдений хотя бы в некоторых пунктах. Спутниковая информация, касающаяся испарения и осадков [4], также нуждается в проверке и «привязке» по фактическим контактным данным наблюдений. Именно такие данные обработаны в данном исследовании и применены для расчета потоков влаги с разными периодами осреднения исходных гидрометеорологических параметров. Таким образом, приводимые здесь рассчитанные значения испарения и поправочные коэффициенты при разных значениях периода осреднения могут быть использованы как в моделях и прогностических схемах, так и для проверки надежности данных из архивов и баз данных разного происхождения.

Методы и оценки точности расчета испарения

Как известно, формула для расчета испарения (вертикального потока влаги) имеет вид

$$E_V = 0,622 P_0^{-1} \rho C_E \left(E_{0w} - e_a \right) W, \tag{1}$$

где P_0 — атмосферное давление на уровне моря (гПа); ρ — плотность воздуха (кг/м^3); e_a — парциальное давление водяного пара (гПа); E_{0w} — парциальное давление водяного пара, насыщенного при температуре воды T_w (°C); W — скорость ветра в приводном слое (м/с).

В формулу (1) входит коэффициент обмена влагой C_E, определение которого является задачей параметризации потоков влаги на границе океан — атмосфера [1, 5, 6]. Известно, что коэффициент C_E зависит от скорости ветра W, перепада влажности δE, стратификации и высоты z, на которой выполнялись измерения ([1, 3, 6—13] и др.). Многообразие подходов к параметризации процессов обмена привело к весьма широкому диапазону значений коэффициента обмена, предлагаемых разными авторами. Обобщения, позволяющие сопоставлять различные методы расчета, можно найти в работах [1, 2, 10, 13]. Как правило, значения коэффициента C_E составляют примерно $(1,0\ldots1,7)\cdot10^{-3}$. Иногда коэффициент C_E принимается постоянным. Например, в работе [14] $C_E = 1,3\cdot10^{-3}$. Однако использование средних значений коэффициента обмена без учета различий в гидрометеорологических условиях приводит к значительным погрешностям в расчетах потоков влаги (по оценкам в работе [10] равным ±27 %).

В [1] в качестве меры различия в подходах к расчету потоков тепла и влаги (при различных периодах осреднения) предложены коэффициенты вида

$$\xi_E\left(\tau, C_E, W, \delta e\right) = \frac{E\left(\tau, C_E, W, \delta e\right)}{\overline{E}\left(C_E, \overline{W}, \overline{\delta e}\right)}, \tag{2}$$

где в числителе — поток влаги по срочным данным, затем суммированное за период τ («корректный подход» по Лаппо и Гулеву [1]), а в знаменателе — осреднение

гидрометеорологических параметров в формуле (1) за тот же период, используемое для расчета потока («некорректный подход»); $\delta e = \left(E_{0w} - e_a\right)$. По сути, коэффициент ξ представляет собой функцию самих параметров и от периода осреднения.

Согласно [1, 3], эти поправки при месячном и годовом осреднении имеют следующий вид:

$$\xi_E\left(\tau, \delta e, W\right) = 0{,}058\left(\ln\tau - 3{,}144\right)^{1+0{,}059\overline{\delta e(\tau)}+0{,}034\overline{W(\tau)}} + 1{,}039 \text{ при } 3 \text{ ч} < \tau \le 720 \text{ ч}, \quad (3)$$

$$\xi_E\left(\tau, \delta e, W\right) = 0{,}063\left(\ln\tau - 3{,}826\right)^{1+0{,}109\overline{\delta e(\tau)}+0{,}0084\overline{W(\tau)}} + 1{,}023 \text{ при } 1 \text{ мес} < \tau \le 24 \text{ мес}. \quad (4)$$

Величины $\overline{\delta e(\tau)}$ и $\overline{W(\tau)}$ в (2) — (4) соответствуют осредненным за период τ параметрам. По оценкам в [1, 15] месячное осреднение занижает значения потоков испарения на 27 % относительно данных срочных наблюдений, а годовое осреднение — на 23 % относительно месячного осреднения, или на 54 % относительно срочных наблюдений.

Таким образом, формула (1) при применении в широтах открытого океана с высокой синоптической изменчивостью приводного слоя атмосферы и выраженным сезонным ходом должна быть дополнена коэффициентами (2) — (4), учитывающими масштаб осреднения параметров по времени:

$$E_V = \xi_E^{(\tau)} 0{,}622 \overline{P_0^{-1}} \overline{\rho} \overline{C_E} \overline{\delta E} \overline{W}. \quad (5)$$

Кроме того, в [1, 15] указывалось, что зависимость C_E от гидротермодинамических условий должна дополняться зависимостью ξ_E от масштабов пространственно-временного осреднения, также возникающей из-за нелинейности в выражениях (1) или (5). Например, в соответствии с [15], относительно наблюдений в точке пространственное двухградусное осреднение занижает потоки испарения на 28 %, а пятиградусное — на 46 %.

В случае среднемесячных или годовых климатических величин $\overline{\delta e}, \overline{W}$ месячное или годовое осреднение по [1] необходимо еще дополнить осреднением по ансамблю календарных месяцев или лет и в формуле (5) вместо $\xi^{(\tau)}$ следует использовать величины $\left[\overline{\xi^{(\tau)}}\right]$, также зависящие от динамических характеристик приводного слоя и стратификации и связанные с $\xi^{(\tau)}$ соотношениями

$$\left[\overline{\xi_E^{(30)}}\right] = \xi_E^{(30)}\left(1 + 0{,}053\overline{\delta e} + 0{,}0039\overline{W}\right); \quad \left[\overline{\xi_E^{(365)}}\right] = 1{,}149\xi_E^{(365)}. \quad (6)$$

Для понимания масштаба изменчивости величин обратимся к табл. 1, в которой, кроме размаха сезонного хода и климатических среднегодовых значений E и C_E, рассчитанных для района В11 (Западная Балтика) [16] по методикам разных авторов, представлены и отношения этих значений C_E к значениям коэффициента C_E, приведенным в работах С.К. Гулева [1, 3].

В табл. 1 приводятся примеры расчета C_E по двум методикам для данных срочных наблюдений [9, 11] — наименьшие значения C_E, а также по пяти методикам

для месячных данных [3, 7, 8, 12, 14] — наибольшие значения C_E. Отношение коэффициентов влагообмена C_E, рассчитанных по методикам [8, 12] к C_E по Гулеву [3] в среднегодовом масштабе составило 0,95—0,97.

Таблица 1

Рассчитанные по методикам разных авторов размах колебаний сезонного хода и годовые значения испарения E (мм), коэффициенты влагообмена $C_E \cdot 10^{-3}$ и отношение C_E разных авторов к C_E по С.К. Гулеву [3] ($C_E / (C_E)_Г$) для района В11 (1951—2000 гг.) по данным [16]

Calculated by the methods of different authors, the amplitude of seasonal variations and annual evaporation values E (mm), moisture exchange coefficients $C_E \cdot 10^{-3}$ and the ratio of C_E of different authors to C_E according to S.K. Gulev [3] ($C_E / (C_E)_Г$) for the B11 region (1951—2000) according to [16]

Авторы методики	Испарение E		$C_E \cdot 10^{-3}$		$C_E / (C_E)_Г$	
	Размах мм	мм/год	Размах	Среднее	Размах	Среднее
Радикевич, 1970 [11]	18,9—65,1	492,2	1,16—1,50	1,43	0,52—0,70	0,61
Бортковский, 1971 [9]	17,5—65,7	501,8	1,10—1,33	1,26	0,55—0,68	0,61
Ариэль и др., 1973 [7]	20,2—75,5	570,9	1,27—1,54	1,44	0,63—0,78	0,70
Ефимов и др., 1985 [14]	20,7—67,8	511,4	1,3—1,3	1,3	0,56—0,69	0,63
Шулейкин, 1968 [12]	30,9—105,1	774,8	1,91—2,02	1,96	0,87—1,03	0,95
Атлас, 1963 [8]	31,5—107,1	790,1	1,94—2,05	2,00	0,89—1,05	0,97
Гулев, Украинский, 1989 [3]	29,9—120,4	833,0	1,88—2,31	2,06	1,00—1,00	1,00

Из табл. 1 следует, что использование значений коэффициента C_E, рассчитанных по разным методикам, приводит к разбросу годового значения испарения в районе В11 от 492 до 833 мм. Кроме того, ранее в [17] было показано, что рассчитанное по методике С.К. Гулева [3] значение испарения, равное E = 300,4 км^3/год (или 716 мм с учетом среднего значения площади Балтийского моря, равного 419 тыс. км^2), для всей Балтики оказалось на 30—40 % выше результатов других авторов, в то время как значение E = 202,8 км^3/год (484 мм), полученное авторами настоящей работы по методике Н.З. Ариель [7], близкО́ к средним значениям. Таким образом, оценки годовых значений испарения E для Балтийского моря по данным разных авторов составляют от 170 км^3/год (406 мм) [18] до 300 км^3/год (716 мм) [17].

Целью настоящей работы является определение поправочных коэффициентов $\xi^{(\tau)}$ для расчета испарения при разных периодах осреднения входящих в формулу (1) параметров приводного слоя при фиксированном значении коэффициента обмена влагой C_E.

Исходные данные, материалы и методика расчетов при разных периодах осреднения

Для анализа расчетов E и C_E использовались данные натурных наблюдений температуры воздуха T_a (°С) и воды T_w (°С), относительной влажности f (%), атмосферного давления на уровне моря P_0 (гПа) и скорости ветра W (м/с) (дискретность

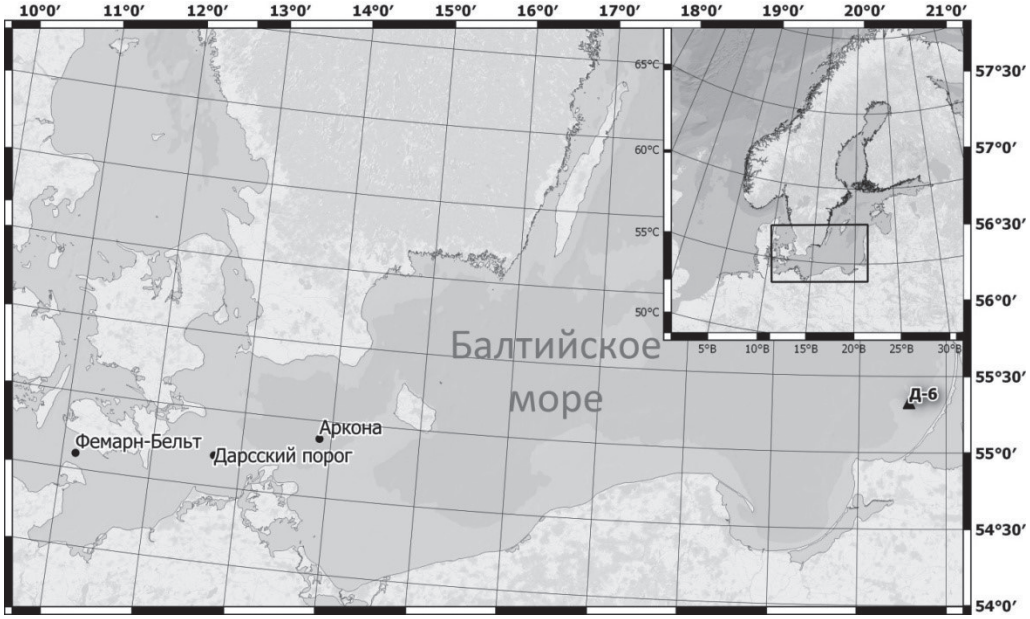

Рис. 1. Карта района исследований: указано положение станций мониторинговой сети MARNET и морской ледостойкой стационарной платформы Д-6.

Fig. 1. Map of the research area: the location of the stations of the monitoring network MARNET and the sea ice-resistant stationary platform Д-6 is indicated.

1 ч), на станциях Аркона (Arkona Basin) (54°53′ с.ш., 13°52′ в.д.) и Дарсский порог (Darss Sill) (54°42’ с.ш., 12°42’ в.д.) мониторинговой сети MARNET (рис. 1) за 2002—2016 гг. (соглашение 2518/2014-002 и 2518/2016-075), предоставленные Немецким центром океанографических данных (BSH/DOD M41).

Были выполнены следующие операции:

1) расчет значений испарения на обеих станциях за каждый час ($E_{час}$) и приведение к суткам $E_{сут}$ (суммированием за 24 час), к месяцу $E_{мес}$ (суммированием по числу дней в месяце), к году $E_{год}$ (суммированием за год); сравнение со значениями испарения, рассчитанными по осредненным за сутки, месяц и год гидрометеорологическим параметрам ($\bar{E}_{сут}$, $\bar{E}_{мес}$, $\bar{E}_{год}$);

2) сравнение значений испарения на обеих станциях за каждые сутки ($\bar{E}_{сут}$), приведенных к месяцу $E_{мес}$ и к году $E_{год}$, со значениями, полученными по осредненным за месяц и год гидрометеорологическим параметрам ($\bar{E}_{мес}$, $\bar{E}_{год}$);

3) сравнение значений испарения на обеих станциях за месяц ($\bar{E}_{мес}$), приведенных к году $E_{год}$, со значениями, полученными по осредненным за год гидрометеорологическим параметрам ($\bar{E}_{год}$).

В табл. 2 представлены месячные и годовые значения испарения E (мм) на станциях Аркона и Дарсский порог (далее ст. Дарсс), рассчитанные с различной дискретностью и при коэффициенте влагообмена $C_E = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$. Такое значение

коэффициента наиболее часто используется при расчетах испарения на границе раздела атмосфера — океан и было выбрано авторами для дальнейших расчетов. Длина суточных выборок составила 2665 и 2940 для станций Аркона и Дарсс соответственно. Это меньше, чем общее число дней за период 2002 —2016 гг., так как в наблюдениях были пропуски (по-видимому, в период проведения профилактики, ремонта поврежденных датчиков и пр.). Расчеты проводились только по тем суткам, когда наблюдениями была охвачена большая часть суток. Длина месячных выборок составила 153 и 134 месяца для станций Аркона и Дарсс соответственно, и это тоже связано с тем, что для расчета использовались только месяцы с практически полным набором данных. Для годовых выборок оказалось 10 и 9 полных лет для станций Аркона и Дарсс соответственно.

Таблица 2

Средний многолетний внутригодовой ход испарения *E* (мм) на станциях Аркона и Дарсс, рассчитанный с различной дискретностью

The average long-term intra-annual course of evaporation *E* (mm) at Arkona and Darss stations, calculated with different discreteness

Дискретность	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Аркона (2002—2016)													
Час	63,4	29,6	21,1	15,2	15,1	35,9	48,1	81,9	76,7	89,3	84,8	61,1	622,2
Сутки	63,3	29,3	21,1	14,7	14,6	35,6	47,3	81,7	77,1	89,4	85,2	61,6	620,9
Месяц	53,8	24,5	15,1	6,9	5,2	20,9	39,0	69,3	73,0	85,6	70,9	56,3	520,4
Год	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	481,3
Дарсский порог (2003—2016)													
Час	46,3	27,5	14,2	11,0	19,1	33,5	50,6	61,5	65,1	77,4	64,8	47,0	518,1
Сутки	46,3	27,7	14,2	10,8	18,7	33,0	49,8	61,3	64,7	77,6	65,1	47,3	516,6
Месяц	45,4	25,5	11,8	3,8	9,3	24,3	38,8	50,2	62,1	71,9	59,5	46,5	449,2
Год	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	423,0

Сравнение значений испарения, рассчитанных по ежечасным данным наблюдений и затем приведенных к суткам ($E_{сут}$), и значений испарения, рассчитанных по среднесуточным значениям гидрометеорологических элементов ($\bar{E}_{сут}$) за весь период наблюдений для обеих станций, показало, что средние значения совпадают: для ст. Аркона $E_{сут} = \bar{E}_{сут}$ =1,8 мм; для ст. Дарсс $E_{сут} = \bar{E}_{сут}$ = 1,5 мм. Значения коэффициента корреляции практически равны единице, и средние квадратические отклонения совпадают в обоих расчетных рядах (для ст. Аркона $\sigma_x = \sigma_y$ = 1,8 мм; для ст. Дарсс $\sigma_x = \sigma_y$ = 1,7 мм).

Это убедительно свидетельствует о том, что суточное осреднение исходных параметров не приводит к существенным отклонениям от результатов расчета испарения по данным срочных наблюдений, и, следовательно, такое осреднение возможно при любых расчетах, по крайней мере, в Балтийском море. По оценкам, представленным в работе [1], для Северной Атлантики различие в результатах расчета испарения по срочным значениям и осредненным за сутки составляет 4 %. Сравнение результатов авторов настоящей работы и оценок из работы [1] будет приведено ниже.

Сравнение значений испарения, рассчитанных по ежечасным наблюдениям, суммированным за сутки и за месяц ($E_{мес}$, мм/мес), и значений испарения, рассчитанных по среднемесячным данным ($\bar{E}_{мес}$, мм/мес) для обеих станций, показывает систематическое занижение оценок испарения, рассчитанных по среднемесячным значениям гидрометеорологических элементов примерно на 24—26 %. Коэффициент корреляции при этом составляет 0,90 для ст. Аркона и 0,94 для ст. Дарсс, а уравнения регрессии имеют вид

$$\overline{E}^{А}_{мес} = 0,845E^{А}_{мес} - 0,064, \quad (7)$$

$$\overline{E}^{Д}_{мес} = 0,910E^{Д}_{мес} - 1,557. \quad (8)$$

Графики связи значений испарения по осредненным за месяц данным и значений испарения по «срочным» данным для обеих станций имеют явный линейный характер (рис. 2), но разброс точек существенно больше, чем при осреднении с периодом одни сутки.

При сравнении значений испарения, рассчитанных по среднегодовым значениям гидрометеорологических элементов ($\bar{E}_{год}$, мм/год), с «почасовыми» значениями, суммированными за сутки, месяц и год ($E_{год}$, мм/год), выявлено занижение до 34—35 %. Полученные уравнения регрессии имеют вид

$$\overline{E}^{А}_{год} = 0,493E^{А}_{год} + 179,63, \quad (9)$$

$$\overline{E}^{Д}_{год} = 0,536E^{Д}_{год} + 138,18. \quad (10)$$

Значения коэффициента корреляции существенно ниже, чем в первых двух случаях, и равны 0,64 и 0,91. Хотя последнее значение достаточно высокое, но длина рядов (10 и 9 лет) явно недостаточна для надежного вычисления коэффициентов корреляции. В математической статистике для надежного вычисления коэффициента корреляции и построения уравнений регрессии достаточной считается длина ряда не менее 30—40 членов. Однако для более полного охвата возможных периодов осреднения были построены уравнения регрессии для периодов осреднения до 1 года (рис. 3).

Вторая серия аналогичных расчетов произведена для случая, когда за аргумент (x) приняты значения испарения $\bar{E}_{сут}$, рассчитанные по средним суточным значениям параметров и затем приведенные суммированием к месяцу и году, а за функцию y — значения, рассчитанные по среднемесячным и среднегодовым данным. Например, если отсутствуют данные срочных наблюдений, но есть средние суточные значения или данные наблюдений, выполненных один раз в сутки.

Уравнения регрессии при месячном осреднении сходны с уравнениями (7) — (8) и для станций Аркона и Дарсс имеют следующий вид соответственно:

$$\overline{E}^{А}_{мес} = 0,841E^{А}_{мес} + 0,20, \quad (11)$$

$$\overline{E}^{Д}_{мес} = 0,909E^{Д}_{мес} - 1,45. \quad (12)$$

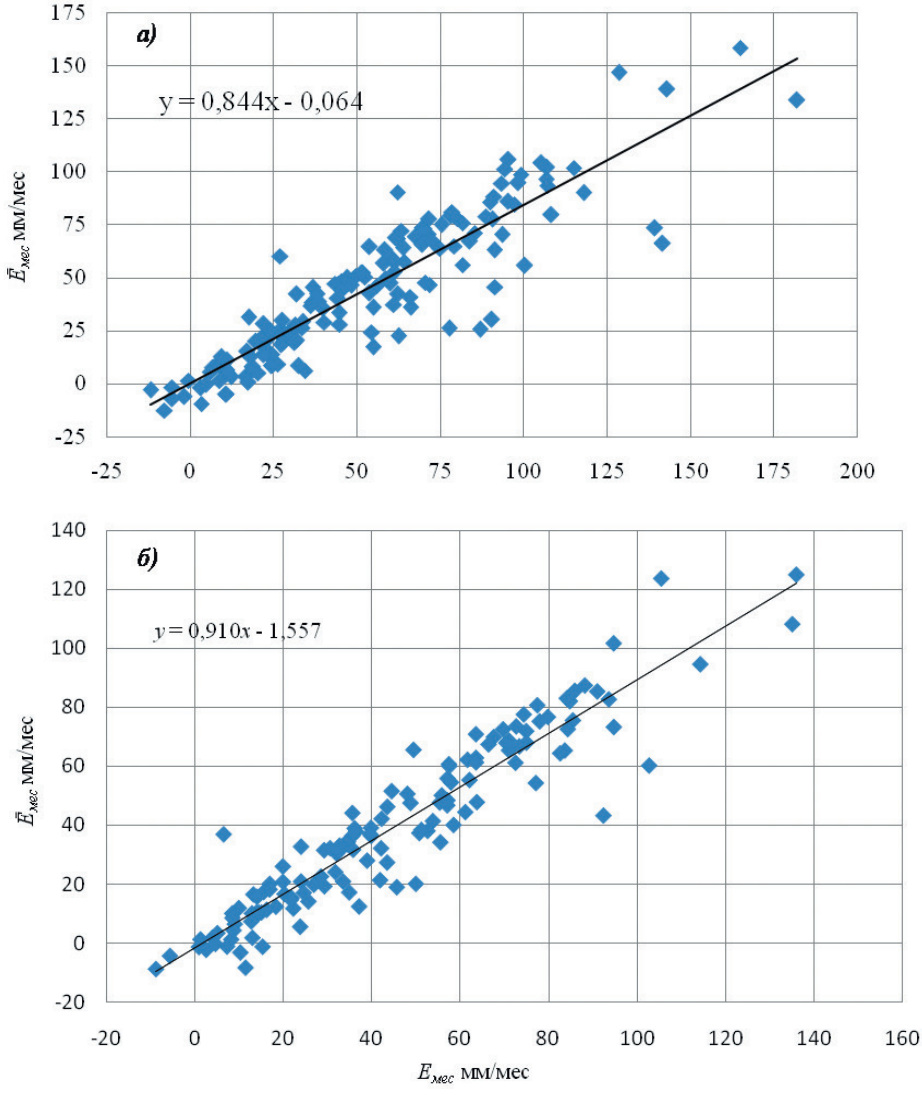

Рис. 2. Связь значений испарения, рассчитанных по среднемесячным значениям гидрометеорологических величин ($\bar{E}_{мес}$, ось ординат), со значениями испарения, суммированными за сутки и месяц ($E_{мес}$, ось абсцисс), для ст. Аркона (*а*) и ст. Дарсс (*б*).

Fig. 2. The relationship between the evaporation values calculated from the monthly average values of the hydrometeorological values ($\bar{E}_{mon}$, ordinate), with the evaporation values summed over the day and month (E_{mon}, abscissa), for st. Arkona (*a*) and st. Darss (*б*).

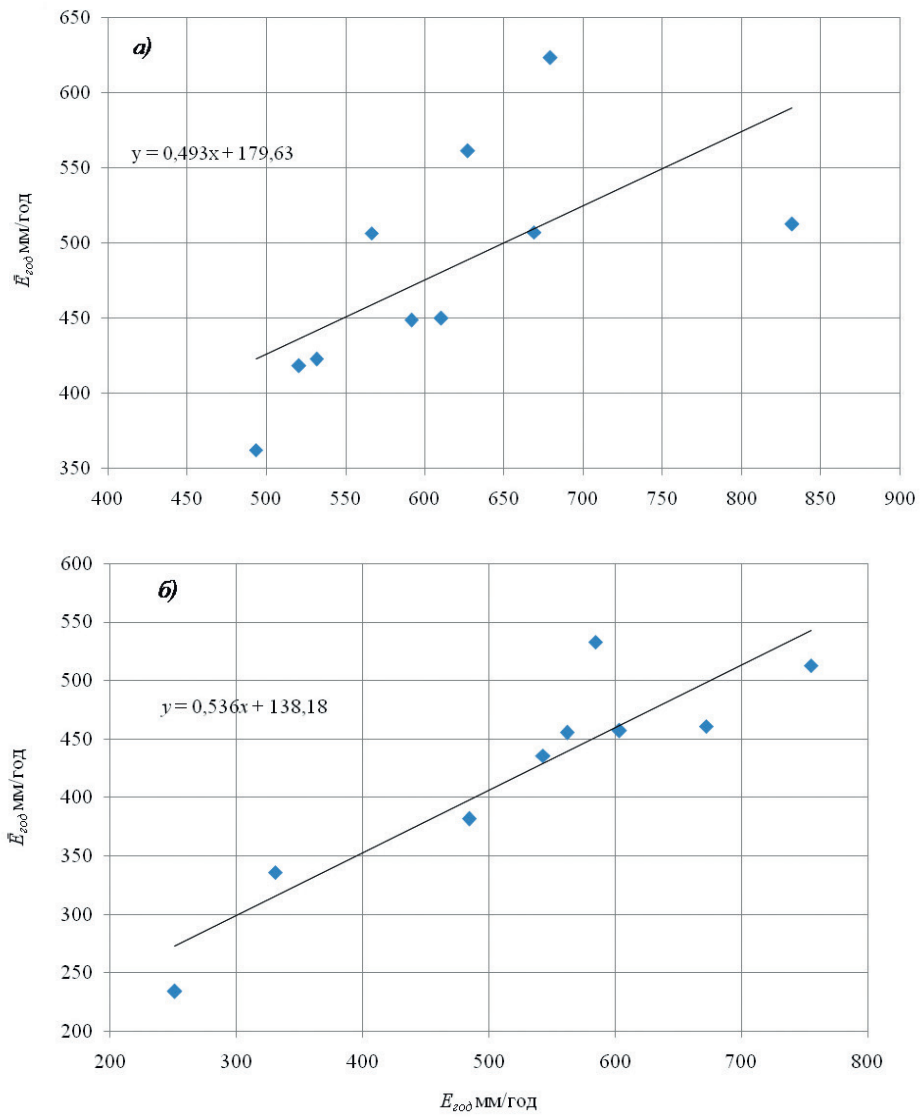

Рис. 3. Связь значений испарения, рассчитанных по среднегодовым значениям гидрометеорологических величин ($\bar{E}_{год}$, ось ординат), с «почасовыми» значениями, суммированными за сутки, месяц и год ($E_{год}$, ось абсцисс) для ст. Аркона (*а*) и ст. Дарсс (*б*).

Fig. 3. The relationship between the evaporation values calculated from the average annual values of hydrometeorological values ($\bar{E}_{year}$, ordinate), with the “hourly” values, summed over the day, month and year (E_{year}, abscissa) for st. Arkona (*a*) and st. Darss (*б*).

При годовом осреднении уравнения регрессии схожи с уравнениями (9) — (10) и имеют вид

$$\overline{E}^{A}_{год} = 0,340E^{A}_{год} + 261,59, \tag{13}$$

$$\overline{E}^{Д}_{год} = 0,536E^{Д}_{год} + 138,79. \tag{14}$$

Коэффициенты уравнений регрессии (11) — (14) и уравнений (7) — (10) различаются незначительно, чего и следовало ожидать с учетом тесной линейной связи значений потоков влаги, рассчитанных по ежечасным данным наблюдений и рассчитанных по среднесуточным значениям гидрометеорологических параметров. Таким образом, аргументы (x) в уравнениях регрессии (7) — (10) и в уравнениях (11) — (14) связаны линейно с коэффициентом корреляции, близким к единице, поэтому и уравнения регрессии различаются незначительно.

Занижение от среднесуточной к месячной дискретности, как и от среднесуточной к годовой дискретности, мало изменилось по сравнению с занижением от часовой дискретности и составило от 16 до 35 %. Таким образом, допустимо с точностью до 2—4 % использование средних суточных значений исходных данных, но при осреднении за месяц и год нужно вводить поправочный коэффициент ξ_E.

Третья серия расчетов произведена для случая, когда за аргумент (x) приняты значения испарения, рассчитанные по средним месячным значениям параметров и затем суммированные за год $E_{год}$, а за функцию y — значения, рассчитанные по среднегодовым данным $\bar{E}_{год}$. Уравнения регрессии при годовом осреднении для станций Аркона и Дарсс имеют вид

$$\overline{E}^{A}_{год} = 0,916E^{A}_{год} + 4,59, \tag{15}$$

$$\overline{E}^{Д}_{год} = 0,830E^{Д}_{год} + 44,21. \tag{16}$$

Средние значения при расчете по среднегодовым значениям параметров занижены на 10—12 %, средние квадратические отклонения отличаются на 15—20 %, коэффициенты корреляции в этом случае достаточно высокие (0,97 и 0,98). Но высокие значения коэффициента корреляции при годовом осреднении, так же как и в предыдущей серии расчетов, не показательны, так как ряды слишком короткие.

Обсуждение результатов

Наиболее простой способ оценки коэффициента для коррекции рассчитанных значений испарения $\xi_E^{(\tau)}$ — это сравнение средних по всему ряду значений испарения [$E_{сут}$], [$E_{мес}$], [$E_{год}$], полученных суммированием за соответствующий период значений, рассчитанных по срочным данным $E_{час}$ («корректный» подход по [1]), и средних значений, полученных по осредненным гидрометеорологическим параметрам [$\bar{E}_{сут}$], [$\bar{E}_{мес}$], [$\bar{E}_{год}$] (при «некорректном» подходе):

$$\xi_E^{(1)} = \frac{\left[E_{сут}\right]}{\left[\overline{E}_{сут}\right]}, \quad \xi_E^{(30)} = \frac{\left[E_{мес}\right]}{\left[\overline{E}_{мес}\right]}, \quad \xi_E^{(365)} = \frac{\left[E_{год}\right]}{\left[\overline{E}_{год}\right]}. \tag{17}$$

Результаты расчета коэффициента коррекции $\xi_E^{(\tau)}$ по формулам (17) при разных периодах осреднения в наших расчетах и по оценкам, приведенным в работах [1] и [15], представлены в табл. 3. В таблице для коэффициента $\xi_E^{(30)}$ через слэш приведены значения при осреднении час — месяц и сутки — месяц, а для коэффициента $\xi_E^{(365)}$ — значения при осреднении час — год, сутки — год, месяц — год.

Таблица 3

Коэффициенты коррекции $\xi_E^{(\tau)}$ (суточное осреднение $\xi_E^{(1)}$, месячное осреднение $\xi_E^{(30)}$, годовое осреднение $\xi_E^{(365)}$) и ошибка (%) для потока влаги (испарения) при разных периодах осреднения и по данным разных источников

Correction coefficients $\xi_E^{(\tau)}$ (daily averaging $\xi_E^{(1)}$, monthly averaging $\xi_E^{(30)}$, annual averaging $\xi_E^{(365)}$) and error (%) for the moisture flow (evaporation) for different averaging periods and according to different sources

	$\xi_E^{(1)}$	$\xi_E^{(30)}$	$\xi_E^{(365)}$
$\xi_E^{(\tau)}$ по (19)			
Аркона	1,00	1,19/1,18	1,27/1,34/1,08
Дарсс	1,00	1,14/1,14	1,26/1,25/1,08
Макс. $\xi_E^{(\tau)}$ из результатов расчетов по (19)	1,00	1,19	1,34
Значение $\xi_E^{(\tau)}$ по [1]	1,04	1,27	1,52
Максимальное занижение $\Delta E^{(\tau)}$ (%) в расчетах авторов	2	29	35
$\Delta E^{(\tau)}$ (%) по оценкам в [15]	—	27	54

Заключение

На основе результатов представленных расчетов и обзора более ранних исследований были сделаны следующие выводы. Сравнение значений испарения, рассчитанных по данным ежечасных наблюдений и затем суммированных за сутки, месяц, год, и рассчитанных по осредненным значениям гидрометеорологических параметров на станциях Южной Балтики показало, что осреднение параметров за сутки допустимо практически без потери точности (ошибка не более 2—4 %).

Осреднение значений гидрометеорологических параметров за месяц приводит к ошибкам (занижению) в рассчитанных значениях испарения, равным 20—30 %. При осреднении за период порядка года ошибка возрастает до 30—35 %. Эти значения близки к полученным ранее для открытых районов океанов и морей, но несколько меньше, чем полученные для акваторий с большой изменчивостью гидрометеорологических характеристик.

Отмечены незначительные различия в результатах расчетов испарения при одном принятом значении коэффициента ($C_E = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$) между климатическим средним за 1951—2000 гг. для района B11 (511,4 мм/год) и средними за 2002 —2016 гг. на станциях Аркона и Дарсс (520,4 и 449,2 мм/год соответственно). Ошибки за счет осреднения параметров при расчете испарения или потоков влаги велики, но разброс значений коэффициента обмена влагой C_E составляет $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ — $2{,}0 \cdot 10^{-3}$. Такой разброс может превосходить ошибки осреднения.

Представленные выводы и значения коэффициента коррекции справедливы для расчетов испарения (а также, видимо, и для расчетов потоков скрытого тепла) на акватории Балтийского моря и могут использоваться для других акваторий средних и высоких широт, где величины испарения не отличаются на порядки величин (тропики, экватор, зоны значительной изменчивости параметров среды).

Благодарности

Авторы благодарят Немецкий Центр Океанографических Данных (BSH/DOD(M42)) за предоставление данных мониторинговой сети MARNET за 2002—2016 гг. (соглашение 2518/2014-002 и 2518/2016-075).

Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема №0149-2019-0013).

Acknowledgments

The authors thank the German Oceanographic Data Center (BSH / DOD (M42)) for providing MARNET monitoring network data for 2002—2016 (agreement 2518 / 2014-002 and 2518 / 2016-075).

Список литературы

1. *Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 336 с.
2. *Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Rachev A.G., Edson J.B.* Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. P. 571—591. doi:10.1175/1520-0442(2003)
3. *Гулев С.К., Украинский В.В.* Роль различных временных масштабов в процессах энергообмена океана и атмосферы // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25, № 7. С. 675—687.
4. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость испарения и осадков над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 23—34. doi: 10.7868/S0205961416040047
5. *Аверкиев А.С., Беликова Г.И., Белянцев М.А., Каган Б.А., Плинк Н.Л.* Взаимодействие океана и атмосферы (лабораторный практикум). Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 200 с.
6. *Малинин В.Н.* Общая океанология. Ч.1. Физические процессы. СПб: изд-во РГГМУ, 1998. 348 с.
7. *Ариель Н.З., Бортковский Р.С., Бютнер Э.К., Кучеров Н.В., Строкина Л.А.* О расчете среднемесячных значений потоков тепла и влаги над океаном // Метеорология и гидрология. 1973. № 5. С. 3—11.
8. Атлас теплового баланса земного шара / Под ред. М.И. Будыко. М., 1963. 69 л.
9. *Бортковский Р.С.* Расчет турбулентных потоков тепла, влаги и количества движения над морем по данным судовых измерений // Метеорология и гидрология. 1971. № 3. С. 93—98.
10. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 284 с.
11. *Радикевич В.М.* О расчете потоков тепла, влаги и количества движения // Океанология. 1970. Т. X, вып. 5. С. 878—882.
12. *Шулейкин В.В.* Связь между климатом Европы и переносом тепла в Атлантике // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1968. Т. IV, № 3. С. 243—261.
13. *Blanc T.V.* Variation of Bulk-Derived Surface Flux, Stability, and Roughness Results Due to the of Different Transfer Coeffcient Schemes // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15, No 6. P. 650—669.

14. *Ефимов В.В., Тимофеев Н.А., Сычев Е.Н., Куржеевский И.В.* Оценка коэффициентов тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 7. С. 735—743.
15. *Gulev S.K.* Influence of Space-Time Averaging on the Ocean-Atmosphere Exchange Estimates in the North Atlantic Midlatitudes // J. Phys. Oceanogr. 1994. V. 24, No 6. P. 1236—1255.
16. State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment / Eds.: R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 703 p.
17. *Дубравин В.Ф., Маслянкин Г.Е.* Атлас пресноводного баланса Балтийского моря. LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2012. 172 с.
18. *Omstedt A.* Baltic Sea marine system: In introduction. University of Gothenburg. Göteborg, 2009. 37 p.
19. *Дубравин В. Ф., Капустина М. В., Стонт Ж. И.* Оценки потоков тепла на границе вода — воздух в юго-западной части Балтики (2003—2016 гг.) // Известия РГО. 2019. Т. 151, вып. 4. С. 15—26. doi: https://doi.org/10.31857/S0869-6071151415-26

References

1. *Lappo S. S., Gulev S.K., Rozhdestvenskij A.E. Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodejstvie v sisteme okean-atmosfera i energoaktivnye oblasti Mirovogo okeana.* Large-scale heat interaction in the ocean-atmosphere system and energy-active regions of the World Ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 336 p. [in Russian].
2. *Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Rachev A.G., Edson J.B*. Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm. J. Climate. 2003, 16: 571—591. doi:10.1175/1520-0442(2003)
3. *Gulev S.K., Ukrainskiy V.V.* The role of different time scales in the processes of ocean and atmosphere energy exchange. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean. 1989, 25(7): 675—687. [in Russian].
4. *Malinin V.N., Gordeyeva S. M.* Variability of evaporation and precipitation over the ocean based on satellite data. *Issledovaniya Zemly iz kosmosa*. Earth Observations and Remote Sensing. 2016, 4: 23—34 [in Russian]. doi: 10.7868/S0205961416040047
5. *Averkiev A.S., Belikova G.I., Belyancev M.A., Kagan B.A., Plink N.L. Vzaimodejstvie okeana i atmosfery` (laboratorny`j praktikum).* The ocean-atmosphere interaction (laboratory workshop). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 200 p. [in Russian].
6. *Malinin V.N. Obshchaya okeanologiya. CH.1. Fizicheskiye protsessy*. General Oceanology. Part 1. Physical processes. SPb: Publ. Russian State Hydrometeorological University, 1998:348 p. [in Russian].
7. *Ariel` N.Z, Bortkovskij R.S., Byutner E.K., Kucherov N.V., StrokinaL.A.* About the calculation of the monthly average values of heat and moisture flux over the ocean. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 1973, 5: 3—11. [in Russian].
8. *Atlas teplovogo balansa zemnogo shara / pod red. M.I. Budy`ko.* Atlas of the global heat balance / Ed. M.I. Budy`ko. Moskow: 1963: 69 p. [in Russian].
9. *Bortkovskij R.S.* Calculation of turbulent heat, moisture and momentum flows over the sea according to ship measurements. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1971, 3: 93—98. [in Russian].
10. *Kitajgorodskij S.A. Fizika vzaimodejstviya atmosfery i okeana.* The physics of the atmosphere-ocean interaction. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 284 p. [in Russian].
11. *Radikevich V.M.* On the calculation of heat, moisture and momentum fluxes. *Okeanologiya,* Oceanology. 1970, X(5): 878—882. [in Russian].
12. *Shulejkin V.V.* The relationship between the climate of Europe and the transfer of heat in the Atlantic. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean.1968, IV(3): 243—261. [in Russian].
13. *Blanc T.V*. Variation of Bulk-Derived Surface Flux, Stability, and Roughness Results Due to the of Different Transfer Coefficient Schemes. J. Phys. Oceanogr. 1985, 15(6): 650—669.

14. *Efimov V.V., Timofeev N.A., Sy`chev E.N., Kurzheevskij I.V.* Estimate of the Ocean-Atmosphere exchange. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana.* Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean. 1985, 21(7): 735—743. [in Russian].
15. *Gulev S.K.* Influence of Space-Time Averaging on the Ocean-Atmosphere Exchange Estimates in the North Atlantic Midlatitudes. J. Phys. Oceanogr. 1994, 24(6): 1236—1255.
16. State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment /Editors: R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2008: 703 p.
17. *Dubravin V.F., Maslyankin G.E. Atlas presnovodnogo balansa Baltijskogo moray.* Atlas of the freshwater balance of the Baltic Sea. Saarbrücken, Germany: LAPLAMBERT Academic Publishing GmbH&-Co KG, 2012: 172 p. [in Russian].
18. *Omstedt A.* Baltic Sea marine system: In introduction. University of Gothenburg. Göteborg. 2009: 37 p.
19. *Dubravin V.F.*, *Kapustina M.V.*, *Stont Zh.I.* Estimates of heat fluxes at the water-air border in the South-Western part of the Baltic sea (2003-2016). *Izvestiya RGO*. Proceedings of the Russian Geographical society. 2019, 151(4):15—26. [in Russian]. doi: https://doi.org/10.31857/S0869-6071151415-26

Статья поступила 21.11.2019
Принята после доработки в печать 27.02.2020

Сведения об авторах

Аверкиев Александр Сергеевич, д-р геогр. наук, доцент, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского гидрометеорологического университета, e-mail: asav@rshu.ru

Дубравин Владимир Филиппович, д-р геогр. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, e-mail: v_dubravin@mail.ru

Information about authors

Averkiev Alexander Sergeevich, professor, Dr. of Sci., Russian State Hydrometeorological University

Dubravin Vladimir Philippovich, Dr. of Sci., leading researcher of the Laboratory of Shirshov Institute of Oceanology RAS