

А.Е.Липченко, Л.Н.Репетин

*Морское отделение Украинского научно-исследовательского
гидрометеорологического института, г.Севастополь*

МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЧЕРНОГО МОРЯ

Представлены результаты многолетнего мониторинга атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, на основе данных оперативного 6-часового прогноза осадков *NCEP*, массива данных реанализа *GPCC* и расчетов по данным измерений осадков на северном, восточном, южном и западном берегах Черного моря. Полученные результаты позволяют уточнить выполненные ранее расчеты количества осадков, выпадающих на поверхность моря, с большей достоверностью оценить особенности пространственной и временной изменчивости атмосферных осадков над берегами и открытой частью Черного моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *атмосферные осадки, мониторинг, прогноз, реанализ, натурные данные, суммы, тренды, карты, изменчивость, Черное море.*

Осадки играют важную роль в глобальном круговороте энергии и воды. Точное знание количества осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, имеет особое значение для верной оценки водного баланса моря. Высокая заинтересованность в долгосрочном анализе осадков возникает из потребностей оценки воздействия изменений климата на режим морских регионов на разных временных и пространственных масштабах. Атмосферные осадки, как компонента водного баланса Черного моря, соизмеримы с суммарным стоком всех впадающих в него рек [1, 2]. Наряду со стоком рек, осадки являются одним из важных факторов, влияющих на изменения гидрологического и гидрохимического режимов Черного моря [3]. Тем не менее, на протяжении длительного времени при оценке количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, исследователи испытывали серьезные трудности, связанные с недостатком данных измерений осадков над берегами и открытой частью Черного моря (использовались 2 – 5 береговых станций), а также с отсутствием адекватных моделей диагноза и прогноза осадков. Появление на открытых Интернет-сайтах результатов расчетов по таким моделям и данных реанализа, включающих массивы продолжительных береговых измерений осадков, открыли новые возможности в исследовании режима атмосферных осадков Черноморского региона.

В МО УкрНИГМИ в период с 2003 по 2013 гг. проводится мониторинг атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, на основе данных оперативного 6-часового прогноза осадков *NCEP* глобальной численной модели *Global Forecast System (GFS)* (<http://www.wetterzentrale.de>) и данных измерений осадков на береговых станциях Украины [3, 4]. Данные подобных оперативных прогностических моделей являются единственной возможностью получения регулярной информации об особенностях пространственной изменчивости осадков над открытым морем. По

© А.Е.Липченко, Л.Н.Репетин, 2013

результатам мониторинга на основании более 13920 карт были рассчитаны суточные (3480), месячные (116), сезонные (37) и годовые (9) массивы количества осадков, их статистические характеристики, построены суточные, месячные, сезонные, годовые и средние многолетние карты пространственного распределения количества атмосферных осадков, выпадавших на поверхность Черного моря почти за 10 лет. Один из основных результатов работы – выявление близости месячных и годовых величин осадков, выпадающих над морем, вычисленных с помощью метода [3] и по данным равномерно расположенных по периметру Черного моря береговых станций [4].

Учитывая этот результат, были выполнены расчеты количества осадков на основе черноморского фрагмента массива данных реанализа *GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) Full Data Product Version 6* в координатной сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ по всему периметру Черного моря (74 квадрата) за период с 1901 по 2010 гг. (<http://kunden.dwd.de>). Массив основан на среднемесячных величинах осадков, измеренных на действующей сети береговых станций Черного моря, в том числе, украинского, российского, грузинского, турецкого, болгарского и румынского побережий. Эти продолжительные ряды позволили оценить характер сезонных, межгодовых изменений осадков над морем и уточнить карты пространственного распределения осадков, выпадающих на поверхность моря, полученные с помощью прогностической модели *GFS*.

В работе использованы также материалы многолетних регулярных наблюдений над осадками, которые проводились на береговых станциях Ук-

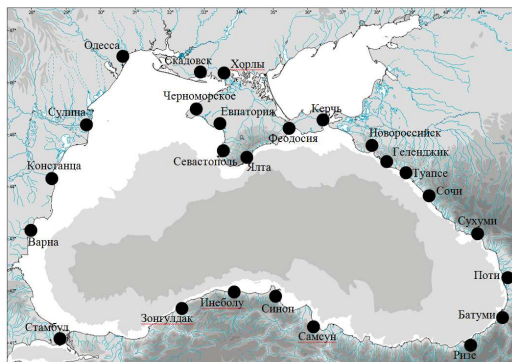


Рис. 1. Расположение береговых станций Черного моря.

раины, России и Грузии (от Одессы до Батуми) с продолжительностью рядов от 15 лет до 141 года. Данные станций использовались для расчета количества осадков вдоль северного и восточного побережий, а также для валидации результатов численного моделирования и данных реанализа. Расположение этих станций, а также станций южного (турецкого) и западного (румыно-болгарского) побережий, среднемесячные ряды которых были выбраны из соот-

ветствующих квадратов массива *GPCC*, представлено на рис.1.

Для оценки сопоставимости информации было проведено сравнение рядов месячных и годовых величин количества осадков, рассчитанных по данным прогностической модели *GFS*, реанализа *GPCC* и по измерениям на береговых станциях. С рядами натуральных измерений на берегах сравнивались синхронные ряды соответствующих станциям квадратов реанализа и прогноза в прибрежной части моря [3, 4]. Кроме этого сопоставлялись ряды месячных и годовых величин количества осадков, выпавших на всю поверхность Черного моря, рассчитанных по данным прогноза (95 квадратов морской поверхности), реанализа (периметр побережья из 74 квадратов) и натурным данным (метод модульных коэффициентов [1, 4]).

Сравнительный анализ 100-летних рядов 9 станций северного и восточного побережий подтвердил надежность данных реанализа *GPCC*. Коррелированность среднегодовых рядов натуральных данных станций и соответствующих этим станциям квадратов *GPCC* достаточно высокая: коэффициенты корреляции изменяются от 0,85 до 0,95. Даже самые короткие ряды измерений (Сухуми – 15, Сочи – 25, Новороссийск – 46 лет) подтвердили высокую корреляцию ($r = 0,95$) с рядами реанализа, при этом средние многолетние величины сравниваемых рядов отличались, в основном, на 1 – 2 %. Исключение составляют пункты Ялта (норма *GPCC* на 100 мм выше) и Батуми (норма *GPCC* почти на 400 мм ниже рассчитанной по измерениям).

На основе откорректированных по данным 27 береговых станций месячных прогностических (*NCEP GFS* + *GPCC*) карт пространственного распределения осадков (построенных за период мониторинга 2004 – 2010 гг.), были рассчитаны и построены карты сезонных сумм осадков и карта годовых сумм осадков, выпадающих на поверхность Черного моря (рис.2).

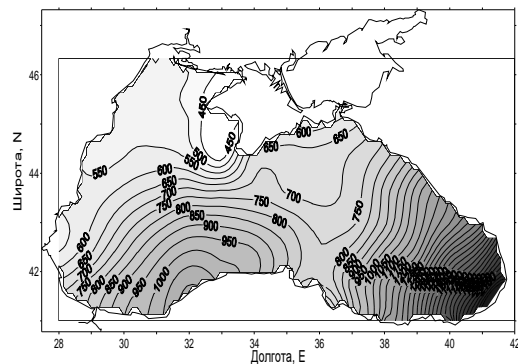


Рис. 2. Среднегодовое (2004 – 2010 гг.) количество осадков (мм), выпадающих на поверхность Черного моря.

предельных за период мониторинга 2004 – 2010 гг.), были рассчитаны и построены карты сезонных сумм осадков и карта годовых сумм осадков, выпадающих на поверхность Черного моря (рис.2). Среднегодовая карта количества осадков, рассчитанная по данным 9-летнего мониторинга отличается от опубликованных ранее [1, 4]. Зона минимума отмечена не в центральной части моря (как в [1]), а примыкает к северному и западному побережьям.

В этой зоне значения количества осадков вдвое выше, чем в [1], но ниже, чем в [4] (400 – 600 мм). В центральной и южной частях моря выделяются две зоны интенсивных осадков: юго-восточная с максимумом до 2300 мм у Батуми и западная с максимумом до 1100 мм у Зонгулдака, которые разделены областью с пониженным количеством осадков (600 – 800 мм), простирающейся от Керченского п-ова до Самсуна.

Сравнение рядов натуральных данных и рассчитанных прогностической моделью *NCEP GFS* в соответствующих станциях квадратах (за период мониторинга 2004 – 2010 гг.) подтвердило ряд важных выводов работы [4]. Модельные оценки оказались существенно (до 50 – 70 %) завышенными по отношению к данным измерений в районах западного (Варна, Констанца, Сулина), северо-западного побережья моря (Одесса, Очаков) и западного Крыма (Черноморское, Евпатория), которые выделяются самым низким количеством осадков. В районах с интенсивными осадками, например на Южном берегу Крыма (Ялта, Феодосия), Анатолийском побережье (Зонгулдак, Инеболу) разница существенно меньше (5 – 10 %). В юго-восточной части моря (Поти, Батуми, Ризе), где выпадает максимальное количество осадков, измеренные величины оказались даже выше прогностических на 5 – 10 %. Таким образом, завышение расчетных величин действительно не является общей тенденцией при количественной оценке осадков с помощью модели *GFS* в Черноморском регионе [4]. Тем не менее, годовые суммы осадков на повер-

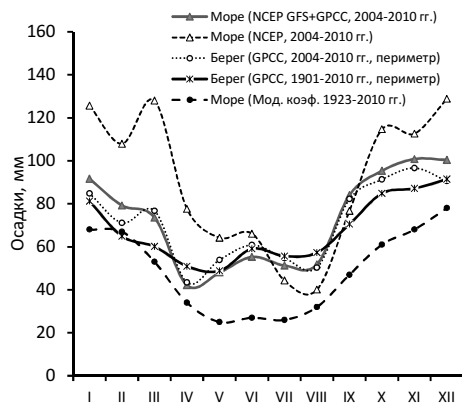


Рис. 3. Годовой ход среднемноголетних месячных величин количества осадков (мм), выпадающих на поверхность Черного моря, вычисленных разными методами.

хность моря, рассчитанные с помощью прогностической модели, оказались завышенными. Анализ расчетных, прогностических и натуральных месячных величин показал, что их различия имеют сезонный характер (рис.3). Максимальное завышение модельных оценок (*GFS*) отмечено в холодный период с

октября по март, когда коэффициенты корреляции не превышают 0,60. В теплый период $r = 0,91$, при этом прогностические оценки занижены.

Расчеты осадков, выпадающих на поверхность моря, основывались на выводе работы [4] о том, что среднеарифметическая величина количества осадков, измеренных на станциях (равномерно расположенных на берегах моря), адекватна средней (из 95 квадратов) величине осадков, выпавших на поверхность Черного моря, несмотря на самые различные варианты пространственного распределения количества осадков на суточных, месячных и годовых масштабах. На рис.3 представлены: оценки прогностической модели *NCEP*, полученные на основании только данных мониторинга 2004 – 2010 гг.; аналогичные величины, рассчитанные за этот же период, но откорректированные по данным 27 береговых станций (*NCEP GFS + GPCC*); месячные величины, рассчитанные за этот же период, но только по массиву реанализа *GPCC* (74 квадрата вдоль периметра моря); среднемноголетние величины, рассчитанные по всему черноморскому фрагменту массива *GPCC* (1901 – 2010 гг.); среднемноголетние величины осадков, рассчитанные с помощью метода модульных коэффициентов [1] за период с 1923 по 2010 гг. Совмещение данных этих расчетов на одном рисунке наглядно показывает степень завышения прогностических оценок и занижения значений осадков, которые традиционно рассчитывались по методу модульных коэффициентов, а также очевидную близость трех кривых, построенных с использованием данных реанализа *GPCC* и натуральных данных. Очевидно, что сравнивать многолетние нормы со средними за 9 лет значениями следует с осторожностью. Тем не менее, кривые годового хода осадков, рассчитанные за период мониторинга для моря (*NCEP GFS + GPCC*) и по береговым массивам (*GPCC*), практически совпадают (разница 1 – 5 %). Среднемесячные величины, по которым эти кривые построены, представляются наиболее достоверными. В таблице сведены средние многолетние величины осадков, рассчитанные вышеперечисленными методами, в том числе по 10 станциям, использованным в работе [4]. Из таблицы следует, что вышеизложенные приемы расчетов дают результаты одного порядка, которые на 20 – 28 % выше метода модульных коэффициентов, использовавшегося до последнего времени при оценке осадков для воднобалансовых расчетов Черного моря.

Вдоль побережья многолетние нормы осадков изменяются от 360 – 390 мм в северо-западной до 1800 – 2600 мм в юго-восточной части Черного моря.

Т а б л и ц а . Среднегодовые величины осадков, выпавших на поверхность Черного моря, вычисленные разными методами.

наименование региона	период (годы)	данные	норма	
			мм	км ³
берег – 10 станций	весь период	станции + <i>GPCC</i>	841	356
берег – 27 станций	весь период	станции + <i>GPCC</i>	834	353
берег (74 кв.)	1901 – 2010	<i>GPCC</i>	812	343
берег (74 кв.)	2004 – 2010	<i>GPCC</i>	856	362
море (95 кв.)	2004 – 2010	<i>NCEP GFS</i> + <i>GPCC</i>	873	369
море	1923 – 2010	модульные коэф.	587	248
море	2004 – 2010	модульные коэф.	681	288

Увеличение количества осадков за последние 30 лет является установленным фактом. Анализ климатических рядов годовых сумм осадков, рассчитанных всю поверхность моря (*GPCC*, 109 лет) и измеренных на береговых станциях (от 109 лет – *GPCC*, до 141 года – станции), показал преобладание значимых положительных коэффициентов линейных трендов, подтверждающих рост осадков над побережьем (от 80 до 255 мм/100 лет) и акваторией Черного моря (55 мм/100 лет). Только у южного побережья (Синоп – Зонгулдак) и в зоне устья Дуная (Сулина) коэффициенты линейных трендов рядов *GPCC* оказались отрицательными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– СПб.: Гидрометеоздат, 1991.– 430 с.
2. *Ильин Ю.П., Симов В.Г., Репетин Л.Н.* Проблемы и перспективы мониторинга водного баланса Черного и Азовского морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.171-181.
3. *Репетин Л.Н., Долотов В.В., Липченко А.Е., Липченко М.М.* Метод расчета количества атмосферных осадков и растворенных химических веществ, выпадающих на акваторию Черного моря, на основе данных натурных измерений и оперативной интернет-информации // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– вып.12.– С.484-497.
4. *Репетин Л.Н., Ильин Ю.П., Долотов В.В., Липченко М.М.* Современные оценки атмосферных осадков, их вклада в водный баланс Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.18.– С.193-204.

Материал поступил в редакцию 12.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати багаторічного моніторингу атмосферних опадів, що випадають на поверхню Чорного моря, на основі даних оперативного 6-годинного прогнозу опадів *NCEP*, масиву даних реаналізу *GPCC* та розрахунків за даними вимірювань опадів на північному, східному, південному і західному берегах Чорного моря. Отримані результати дозволяють уточнити виконані раніше роз-

рахунки кількості опадів, що випадають на поверхню моря, з більшою достовірністю оцінити особливості просторової і тимчасової мінливості ат атмосферних опадів над берегами і відкритою частиною Чорного моря.

ABSTRACT The results of long-term monitoring of atmospheric precipitation on the Black Sea surface, on the basis of operating a 6-hour precipitation forecast *NCEP*, *GPCC* array reanalysis data and calculations based on measurements of precipitation on the northern, eastern, southern and western coasts of the Black Sea are described. The obtained results allow us to clarify the previously performed calculations of precipitation on sea surface, with a greater reliability to estimate spatial and temporal variability of atmospheric precipitation over coasts and open part of the Black Sea.