

# Математическое моделирование морских систем

УДК 551.58.001.572

В.В. Ефимов, А.О. Савченко, А.Е. Анисимов

## Особенности теплообмена Черного моря с атмосферой в осенне-зимний период

С использованием массива данных регионального реанализа атмосферной циркуляции за 50-летний период 1958 – 2007 гг. получены количественные оценки потоков явного и скрытого тепла на поверхности Черного моря в осенний и зимний периоды, а также статистические характеристики величин суммарного потока тепла. Построены синоптические композиты термобарических полей, соответствующих экстремальному выхолаживанию Черного моря. Установлено, что такое выхолаживание происходит в условиях формирования антициклонической области с центром, расположенным северо-западнее Черного моря. Как в осенний, так и в зимний период к экстремальному выхолаживанию моря приводит вторжение холодного воздуха с северо-востока. Получена отрицательная корреляционная связь между зимними среднесезонными значениями потока тепла и индексом Североатлантического колебания (САК). Показана зависимость повторяемости дней с экстремальными потоками от фазы САК: наиболее часто выхолаживание повторяется в отрицательную фазу.

**Ключевые слова:** Черноморский регион, моделирование климата, экстремальные потоки тепла, выхолаживание моря.

**Введение.** Изучение теплового баланса Черного моря имеет давнюю историю. Известны количественные оценки распределения составляющих теплового баланса моря, характеризующие климатические, т. е. осредненные за несколько десятилетий, величины потоков явного, скрытого и суммарного тепла [1, 2]. Однако, по-существу, значения всех составляющих теплового баланса требуют дальнейшего уточнения с использованием новых климатических данных регионального реанализа с повышенным разрешением и новых массивов данных наблюдений. Менее изученным остается пространственно-временная изменчивость поверхностных потоков явного и скрытого тепла на поверхности моря. Для Черного моря характерна значительная неоднородность распределения потоков тепла по акватории, а также естественная временная изменчивость в широком диапазоне масштабов.

Выхолаживание моря в осенне-зимний период максимально в мелководной северо-западной части, где, например, формируется такая интересная особенность термохалинной структуры, как холодный промежуточный слой (ХПС). Считается, что минимум температуры воды на глубинах 50 – 70 м является результатом глубокой конвекции масс холодной воды зимой. Наиболее интенсивное выхолаживание поверхности моря происходит в периоды вторжения масс холодного воздуха через северную границу моря [3]. Статистика повторяемости таких экстремальных явлений мало изучена.

© В.В. Ефимов, А.О. Савченко, А.Е. Анисимов, 2014

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 6

71

**Численная модель.** Пространственное разрешение климатических массивов данных глобального реанализа остается недостаточно высоким для изучения региональных процессов, учитывающих локальные особенности орографии, неоднородности подстилающей поверхности, очертания береговой линии. Чтобы получить статистические характеристики экстремальных явлений для такого сравнительно небольшого бассейна, как Черное море, нужны базы данных с повышенным пространственным разрешением. Для этих целей была использована региональная численная модель климата *HadRM3P*, разработанная Метеорологическим центром Гадлея (Великобритания) (*Met Office Hadley Centre*) в рамках проекта *Providing Regional Climates for Impact Studies (PRECIS)* [4]. Региональная модель адаптируется к ограниченной области и используется для пересчета данных глобальных атмосферных моделей с грубым пространственным разрешением на более мелкую конечно-разностную сетку. В нашем случае модель с горизонтальным пространственным разрешением  $25 \times 25$  км и 19 вертикальными уровнями в атмосфере была адаптирована к области, включающей территорию Черноморского региона. В качестве входных условий использовались данные реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ERA-40*) с пространственным разрешением  $\approx 1,125 \times 1,125^\circ$  [5]. Подробное описание численного расчета с входными данными *ERA-40* за период 1958 – 2001 гг. приведено в работе [6]. Впоследствии массив был дополнен данными, рассчитанными по аналогичной методике, но уже с входными условиями *ERA-Interim* с разрешением  $\approx 0,75 \times 0,75^\circ$  за период 2001 – 2007 гг. [7]. Таким образом, полученный массив данных представляет собой результат ретроспективного анализа региональной атмосферной циркуляции за 50-летний период 1958 – 2007 гг. с повышенным пространственным разрешением.

Для последующего анализа были выбраны ежесуточные значения следующих параметров: потоки явного  $H$  и скрытого  $LE$  тепла на поверхности моря, температура воздуха  $T_a$  на высоте 2 м и скорость ветра  $V$  на высоте 10 м. Потоки в численной модели рассчитывались с использованием известных соотношений

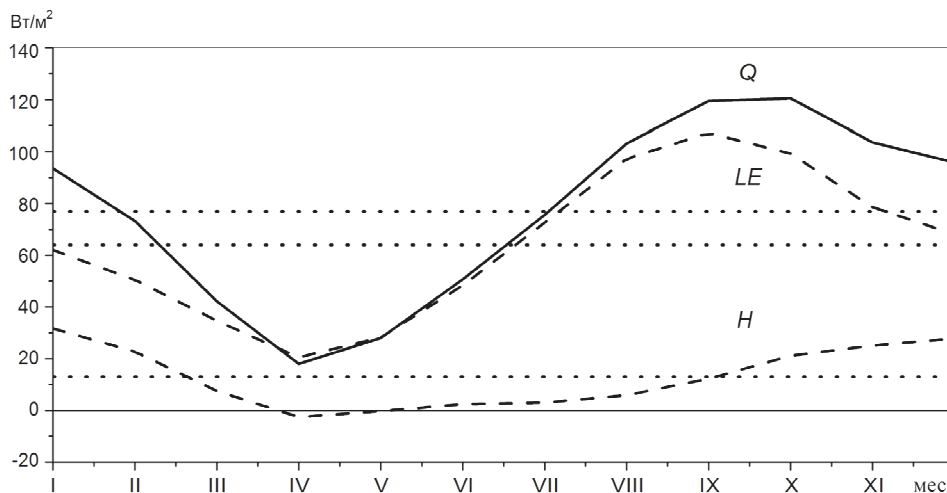
$$H = \rho C_p C_h V (T_s - T_1), \quad (1)$$

$$LE = L \rho C_q V (E_s - e_1), \quad (2)$$

где  $\rho$  и  $C_p$  – плотность и теплоемкость воздуха;  $V$  – скорость ветра на высоте 10 м;  $T_1$  и  $e_1$  – температура и удельная влажность на нижнем расчетном уровне модели;  $T_s$  и  $E_s$  – температура и удельная влажность насыщенного водяного пара на поверхности моря;  $L$  – скрытая теплота парообразования;  $C_h$  и  $C_q$  – коэффициенты, зависящие от стратификации приводного пограничного слоя атмосферы.

**Пространственно-временная изменчивость.** Рассмотрим годовой ход потоков тепла, осредненных по всей поверхности Черного моря за период 1958 – 2007 гг. На рис. 1 приведены значения явного, скрытого потоков и их суммы  $Q = H + LE$ . Радиационные потоки, которые также вычислялись в модели, рассматривать не будем: в зимний период радиационный баланс мал

( $\approx 10 - 20 \text{ Вт/м}^2$ ), в осенний его значения несколько больше, но для нашей цели – анализа процессов экстремального выхолаживания – ими можно с уверенностью пренебречь. Как следует из рис. 1, среднегодовое значение суммарного потока тепла на поверхности моря составляет  $79 \text{ Вт/м}^2$ , причем основной вклад вносят потоки тепла за счет испарения. Наибольшее выхолаживание моря приходится на осенне-зимний период, который и был выбран для дальнейшего анализа.



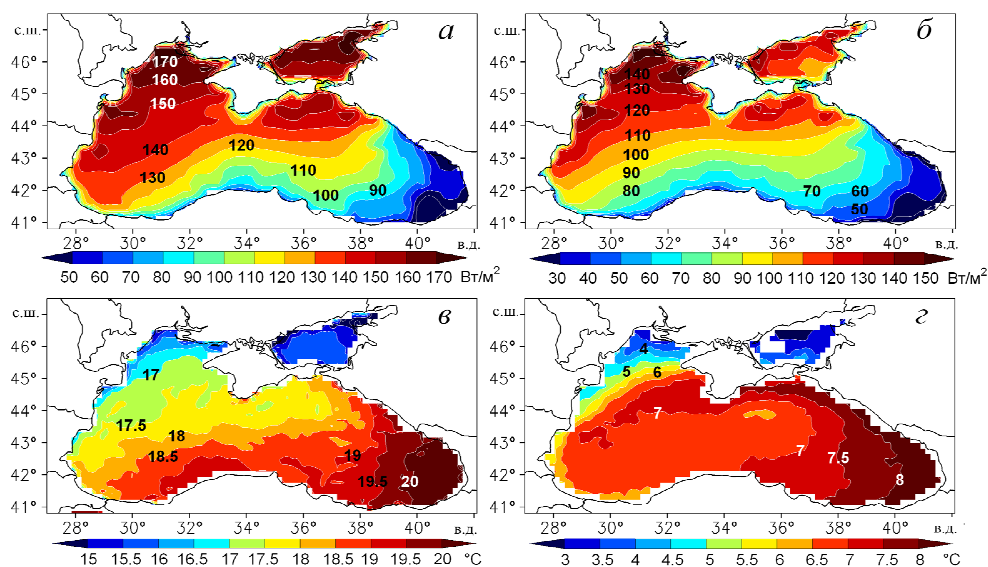
**Рис. 1.** Годовой ход явного ( $H$ ), скрытого ( $LE$ ) и суммарного ( $Q$ ) потоков тепла на поверхности Черного моря по данным регионального реанализа за 1958 – 2007 гг.

На рис. 2, *a*, *б* представлено пространственное распределение среднесезонных за осенний (сентябрь – ноябрь) и зимний (декабрь – февраль) периоды значений потока  $Q$ , осредненных за 1958 – 2007 гг., на рис. 2, *в* – поле температуры поверхности моря (ТПМ) для осеннего месяца (октябрь), на рис. 2, *г* – для наиболее холодного по ТПМ месяца года (февраль) по данным [8]. Как видно, распределение потока тепла по акватории моря существенно неоднородно. Наибольшее значение, т. е. максимальное выхолаживание приходится на северо-западную область Черного моря, поэтому основное внимание будет уделено этому району. Приведенные далее интегральные характеристики относятся к области моря, ограниченной  $44 - 47^\circ \text{ с. ш.}$ ,  $28 - 34^\circ \text{ в. д.}$

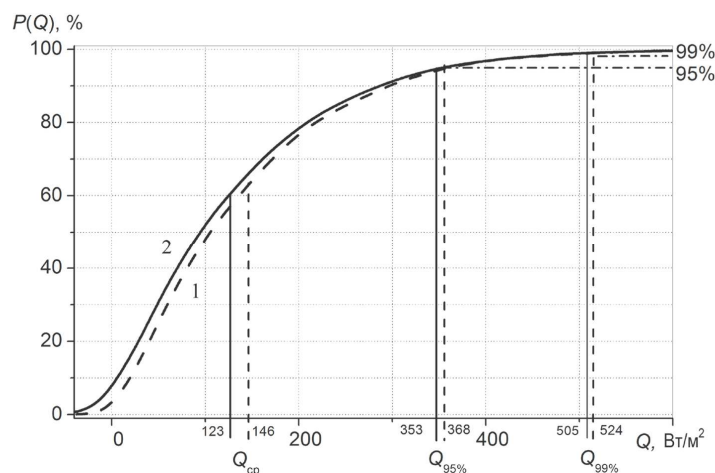
Интересно сравнить распределение потоков тепла по площади моря с распределением температуры его поверхности. Поля  $Q$  и ТПМ качественно близки друг другу: в северо-западной части моря изолинии обоих полей почти линейны, причем значения ТПМ растут, а  $Q$  – монотонно уменьшаются к югу. Такое поведение свидетельствует об определяющей роли потока тепла в выхолаживании поверхностного слоя по сравнению с горизонтальной адвекцией в этом районе моря. Кроме того, этот вывод согласуется с известными представлениями о формировании в зимний период в этой области ХПС в результате процессов локального конвективного перемешивания.

Рассмотрим более детально изменчивость потоков тепла на межсуточных и межгодовых масштабах. На рис. 3 приведены кумулятивные функции рас-

пределения  $P(Q)$  суточных значений суммарного потока тепла  $Q$  для двух выбранных сезонов. Эти функции значительно отличаются от нормального закона распределения: асимметрия (нормированное значение третьего момента функции распределения) составляет 3 – 4. В результате дни с экстремальными потоками тепла, имеющие малые периоды повторяемости и большие величины  $P(Q)$ , дают относительно больший вклад в выхолаживание морской поверхности как в осенние, так и в зимние месяцы. Так, например, дни с экстремальными потоками  $P(Q) = 95\%$  (число которых составляет 5% от общего числа дней) дают вклад  $\approx 16 - 18\%$  в суммарный поток тепла и в осенний, и в зимний периоды, а с  $P(Q) = 90\%$  – около 30%.

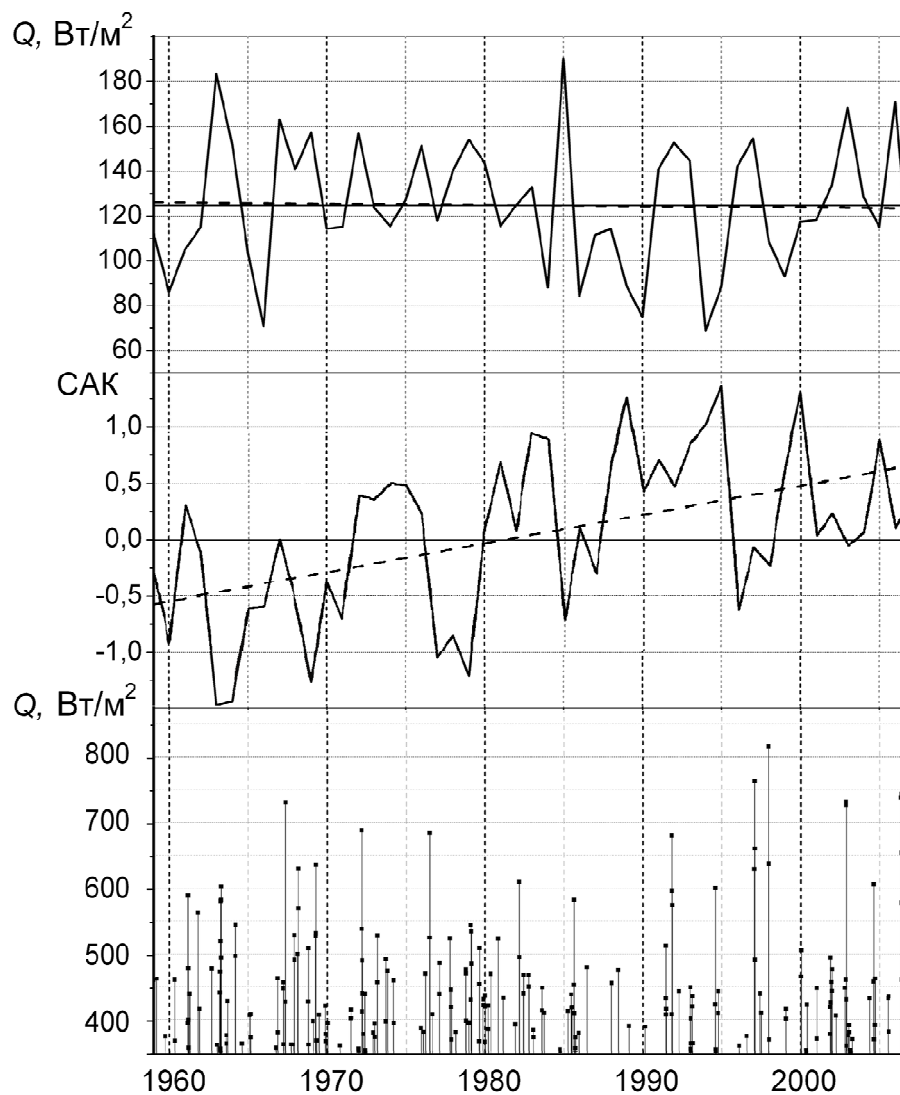


**Р и с. 2.** Пространственное распределение суммарного потока тепла в осенний (а) и зимний (б) периоды 1958 – 2007 гг., а также температура поверхности моря в октябре (в) и феврале (z) в 1986 – 2002 гг. по спутниковым данным из работы [8]



**Р и с. 3.** Кумулятивные функции распределения  $P(Q)$  среднесуточных значений суммарного потока тепла, осредненных для северо-западной части моря, в осенний (1) и зимний (2) периоды  
74 ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 6

**Экстремальные потоки тепла.** Остановимся на статистике и особенностях термобарических полей, соответствующих событиям экстремального выхолаживания моря. Для этих целей из всего массива ежесуточных величин  $Q$  были выбраны значения потоков тепла, превышающие 95%-ный вероятностный уровень, т. е. имеющие период повторяемости 20 сут для осенних и зимних месяцев. В качестве примера на рис. 4 показаны экстремальные значения за зимние месяцы, выбранные из всего 50-летнего периода. Там же даны временные ряды среднесезонных зимних значений индекса Североатлантического колебания (САК), суммарного потока  $Q$  и их линейные тренды.



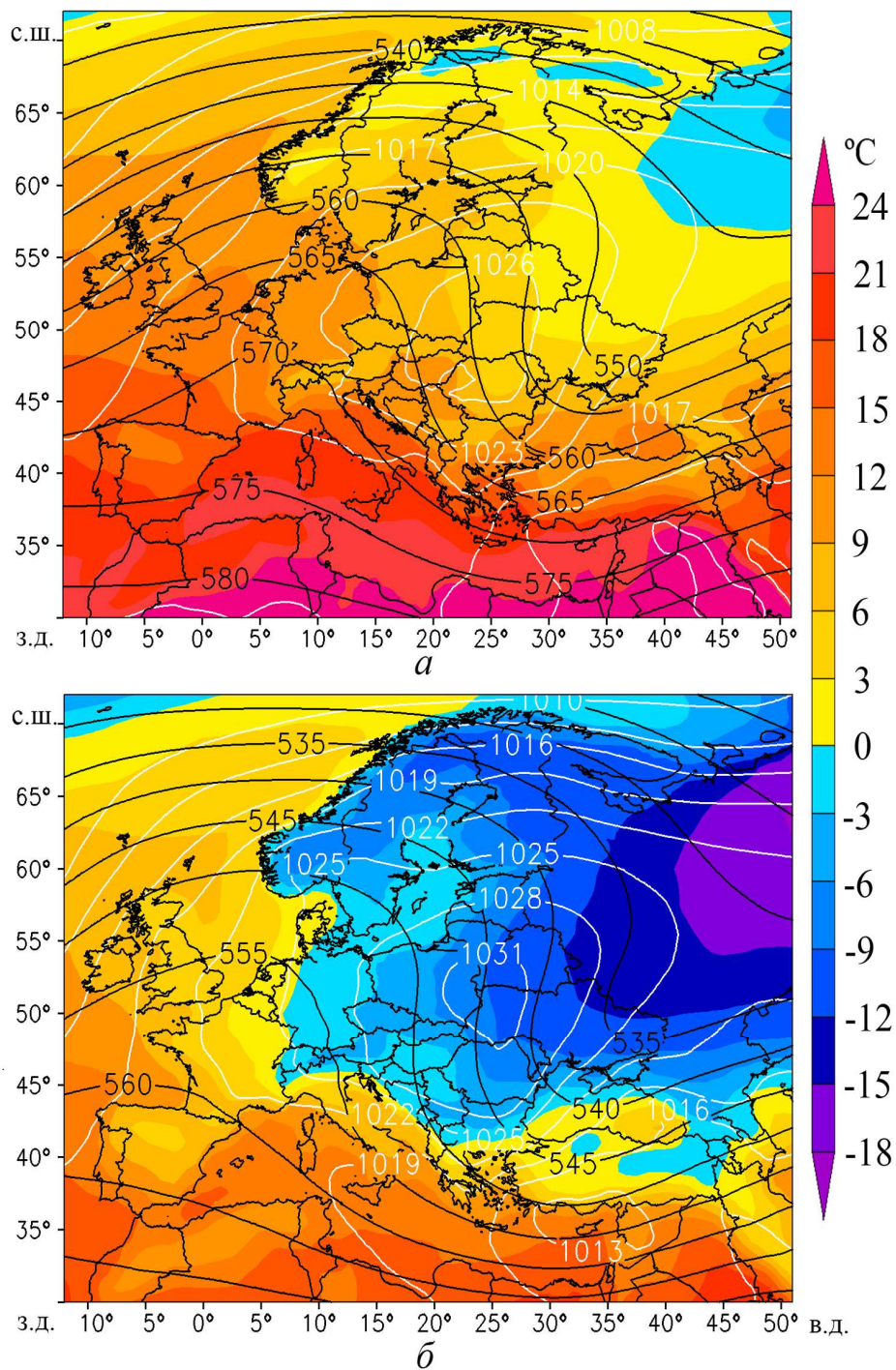
**Р и с. 4.** Многолетний временной ход среднесезонных зимних значений индекса САК, суммарного потока  $Q$  и экстремальных значений среднесуточных потоков, превышающих 95%-ный вероятностный уровень. Штриховой линией показан линейный тренд

Рассмотрим типичную синоптическую ситуацию, соответствующую экстремальному выхолаживанию в осеннее и зимнее время. С этой целью были построены композиты метеорологических полей для дней с экстремальными потоками тепла, превышающими пороговое значение  $P(Q) = 95\%$ , по данным глобальных реанализов *ERA-40* и *ERA-Interim* (которые использовались ранее в качестве входных данных для региональной модели). На рис. 5, а, б показаны композиты полей приземной температуры воздуха и приземного давления, которые являются результатом осреднения 228 полей для осенних периодов и 224 – для зимних. Довольно неожиданным оказалось, что композиты для зимнего и осеннего сезонов достаточно близки. Они сходны между собой наличием области антициклона, причем для обоих сезонов его центр располагается северо-западнее Черного моря. На восточной периферии этого антициклона формируется «язык» холодного приземного воздуха. Северо-восточный поток холодного воздуха с большими скоростями приповерхностного ветра приводит к образованию экстремальных суммарных потоков тепла на морской поверхности.

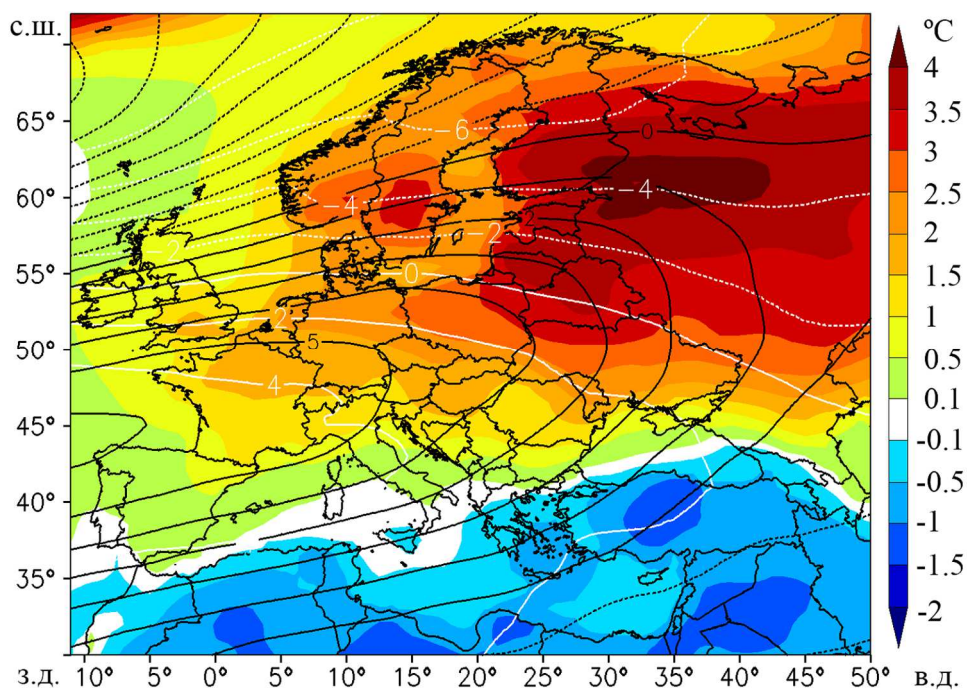
Отметим, что на композитах, осредняющих метеорологические поля (имеющие больший период повторяемости) с большими значениями потока тепла, антициклон имеет еще более выраженную структуру. Таким образом, анализ композитных полей показал, что характерной особенностью барических полей при экстремальном выхолаживании моря в зимний и осенний периоды является образование антициклона, на юго-восточной периферии которого располагается Черное море. Не приводя иллюстраций отметим, что структура отдельных термобарических полей в восточно-европейской части для выбранных экстремальных дней близка к построенным композитам, т. е. она включает синоптический антициклон с центром северо-западнее Черного моря.

Рассмотрим межгодовую изменчивость повторяемости событий экстремального выхолаживания моря. Среди известных физических механизмов, определяющих крупномасштабную изменчивость в Атлантико-Европейском регионе, в первую очередь рассматривается Североатлантическое колебание [9 – 11]. Как известно, САК является одной из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии. Оно выражается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и Субтропической Атлантикой, при этом переход из одной фазы САК в другую вызывает большие изменения в поле ветра, переносах тепла и влаги, в интенсивности и траекториях шторм-треков и т. д. В то же время необходимо отметить, что Черное море находится на значительном удалении от Атлантики и связь термодинамических характеристик атмосферы над морем с индексом САК может быть слабой или неоднозначной [12 – 16].

Были построены также поля приземной температуры воздуха и приземного давления, осредненные отдельно для положительной и отрицательной фазы САК (для индекса, превышающего пороговое значение  $\pm 0,5$ , за вычетом линейного тренда). Их разность показана на рис. 6. Белым цветом обозначена «условная» граница в диапазоне разности температур  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Как видно, северная и южная части Черного моря находятся по разные стороны от этой границы: северная соответствует североевропейской, южная – средиземноморской области влияния САК.



**Р и с. 5.** Композиты полей приземной температуры воздуха (°С, цветом), приземного давления (мбар, белые изолинии) и геопотенциальной высоты поверхности 500 мбар (гп. дам, черные изолинии) для вероятности событий экстремального выхолаживания в северо-западной части моря Р = 95% в осенний (а) и зимний (б) периоды



**Р и с. 6.** Разностные поля приземной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ , цветом), приземного давления (мбар, белые изолинии) и геопотенциальной высоты поверхности 500 мбар (гп. дам, черные изолинии) между положительной и отрицательной фазами САК

Рассмотрим связь экстремальных потоков тепла на межгодовых масштабах с сезонным индексом САК. По временному ряду среднесезонных зимних значений индекса (рис. 4) были выделены дни с экстремальными потоками тепла и подсчитано число дней, соответствующих положительной и отрицательной фазам САК.

В результате получено существенное превышение числа дней с экстремальными потоками тепла в отрицательную фазу САК по сравнению с положительной (таблица). При составлении таблицы выбраны сезоны, когда модуль индекса САК превышал значение 0,5. Видно, что 64% событий, соответствующих 95%-ной вероятности, произошли в отрицательную фазу САК, а события с периодом повторяемости один раз в сезон ( $P = 98,9\%$ ) в 81% случаев происходили в отрицательную фазу САК.

Ранее на рис. 4 были показаны временные ряды значений зимнего индекса САК и среднесезонного потока тепла  $Q$ . Коэффициент корреляции между рядами составил 0,4. Таким образом, в зимний период экстремальное выхоложивание бассейна Черного моря связано с воздействием холодных воздушных масс с севера Европы во время отрицательной фазы САК. Отметим, что был вычислен также соответствующий коэффициент корреляции для осеннего периода, он составил незначимую величину 0,2.



**Характеристики экстремальных суммарных потоков тепла  
для положительной и отрицательной фазы САК в зимний период 1958 – 2007 гг.**

Суммарный поток тепла $Q$		Количество экстремальных событий		Среднее число экстремальных событий за сезон		Процентная доля от всех событий, %	
		САК (+)	САК (-)	САК (+)	САК (-)	САК (+)	САК (-)
%	Вт/м <sup>2</sup>						
> 95	> 353	42	74	3,2	5,7	36	64
> 96,7	> 406	29	47	2,2	3,6	38	62
> 98,9	> 505	4	17	0,31	1,31	19	81

Таким образом, связь потоков тепла в северо-западной части Черного моря с индексом САК в зимние месяцы подтверждается как значимой величиной коэффициента, так и повторяемостью числа экстремальных дней в разные фазы САК. Максимальные потоки, соответствующие минимальным значениям температуры воздуха, достигаются в периоды отрицательной фазы Североатлантического колебания. Интересно отметить, что реакция поля температуры воздуха в Черноморском регионе (по крайней мере в его северной части) на изменение индекса САК противоположна той, что отмечается для региона Средиземного моря, но соответствует реакции в регионе Северной и Центральной Европы. Это хорошо согласуется с приведенным ранее композитом термобарических полей для зимнего времени, который иллюстрирует формирование масс холодного воздуха, вторгающегося с севера в акваторию Черного моря.

**Заключение.** С использованием массива данных регионального реанализа метеорологических полей за 50-летний период приведены количественные оценки потоков явного и скрытого тепла на поверхности Черного моря в осенний и зимний периоды, а также статистические характеристики суммарного потока тепла.

Построены композиты термобарических полей, соответствующих синоптическим ситуациям, приводящим к экстремальному выхолаживанию Черного моря. Общей особенностью композитов является антициклоническая область с центром, расположенным северо-западнее Черного моря. Поток северо-восточного холодного воздуха приводит к экстремальному выхолаживанию моря и в осенний, и в зимний периоды. Получена отрицательная корреляционная связь между зимними среднесезонными значениями потока тепла и индексом САК. Показана зависимость повторяемости дней с экстремальными потоками от фазы САК: наиболее часто выхолаживание повторяется в отрицательную фазу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова, Э.И. Альтмана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 430 с.
2. *Ефимов В.В., Тимофеев Н.А.* Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. – Обнинск: ВНИИГМИ – МЦД, 1990. – 237 с.
3. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 212 с.
4. *Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al.* Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – UK, Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
5. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2010. – 131, № 612. – P. 2961 – 3012.
6. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2011. – 47, № 3. – С. 380 – 392.
7. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2011. – 137, № 656. – P. 553 – 597.
8. *Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичний С.В.* Атлас температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986 – 2002 гг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – 265 с.
9. *Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science.* – 1995. – 269. – P. 676 – 679.
10. *Wanner H., Brönnimann S., Casty C. et al.* North Atlantic Oscillation – concepts and studies // *Surv. Geophys.* – 2001. – 22, № 4. – P. 321 – 381.
11. *Marshall J., Kushnir Y., Battisti S. et al.* North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms // *Int. J. Climatol.* – 2001. – 21, № 15. – P. 1863 – 1898.
12. *Hurrell J.W., Deser C.* North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation // *J. Mar. Syst.* – 2009. – 78, № 1. – P. 28 – 41.
13. *Полонский А.Б., Башарин Д.В.* О влиянии Североатлантического и Южного колебаний на изменчивость температуры воздуха в Европейско-Средиземноморском регионе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2002. – 38, № 1. – С. 135 – 145.
14. *Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н.* О влиянии океана на изменчивость температуры Европейского и Средиземноморского регионов // *Морской гидрофизический журнал.* – 2000. – № 5. – С. 30 – 45.
15. *Kazmin A.S., Zatsepin A.G.* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *J. Mar. Syst.* – 2007. – 68, № 1. – P. 293 – 301.
16. *Kontoyiannis H., Papadopoulos V., Kazmin A. et al.* Climatic variability of the sub-surface sea temperatures in the Aegean-Black Sea system and relation to meteorological forcing // *Clim. Dyn.* – 2012. – 39, № 6. – P. 1507 – 1525.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: vefim38@mail.ru,  
anatolmontreal@ukr.net,  
anisimov1@mail.ru

Материал поступил  
в редакцию 01.04.14  
После доработки 22.04.14

АНОТАЦІЯ З використанням масиву даних регіонального реаналізу атмосферної циркуляції за 50-річний період 1958 – 2007 рр. отримані кількісні оцінки потоків явного та прихованого тепла на поверхні Чорного моря в осінній та зимовий періоди, а також статистичні характеристики

ки величин сумарного потоку тепла. Побудовані синоптичні композити термобаричних полів, які відповідають екстремальному вихолодженню Чорного моря. Встановлено, що таке вихолодження відбувається в умовах формування антициклонічної області з центром, розташованим на північний захід від Чорного моря. Як в осінній, так і в зимовий період до екстремального вихолодження моря призводить вторгнення холодного повітря з північного сходу. Отримано негативний кореляційний зв'язок між зимовими середньосезонними значеннями потоку тепла та індексом Північноатлантичного коливання (ПАК). Показано залежність повторюваності днів з екстремальними потоками від фази ПАК: найбільш часто вихолодження виникає під час негативної фази.

**Ключові слова:** Чорноморський регіон, моделювання клімату, екстремальні потоки тепла, вихолодження моря.

**ABSTRACT** Quantitative estimates of sensible and latent heat fluxes on the surface of the Black Sea in autumn and winter, and statistical characteristics of the total heat flux values are obtained using regional reanalysis data on the 50-year (1958 – 2007) period of atmospheric circulation. Synoptic composites of thermobaric fields corresponding to extreme cooling of the Black Sea are constructed. It is found that such cooling of the Black Sea occurs when the anticyclonic area with its center located to the northwest of the Black Sea is formed. Both in autumn and winter extreme cooling of the sea is a result of cold air surge from the northeast. Negative correlation between the winter average seasonal values of the heat flux and the North Atlantic Oscillation (NAO) index is obtained. Dependence of extreme flux recurrence upon the NAO phase is shown: cooling is repeated most frequently during the negative phase.

**Keywords:** Black Sea region, climate modeling, extreme heat fluxes, sea cooling.