

# Расчет испарения с акватории Каспийского моря по данным дистанционного зондирования

С.А. Лебедев<sup>1</sup>, А.М. Сирота<sup>1</sup>, Л.П. Остроумова<sup>2</sup>, А.Г. Костяной<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Геофизический центр РАН  
119296, Москва, ул. Молодежная, 3  
E-mail: [lebedev@wdcb.ru](mailto:lebedev@wdcb.ru)*

<sup>2</sup> *Государственный океанографический институт  
119034, Москва, Кропоткинский пер., 6  
E-mail: [Lostroumova@mail.ru](mailto:Lostroumova@mail.ru)*

<sup>3</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997 Москва, Нахимовский просп., 36  
E-mail: [kostianoy@online.ru](mailto:kostianoy@online.ru)*

Расчет испарения с акватории Каспийского моря является актуальной задачей для определения водного баланса моря. В отличие от предыдущих подходов в данной работе предлагается использовать данные с метеостанций и данные дистанционного зондирования морской поверхности. Все спутниковые данные верифицировались по данным 19 метеостанций, расположенных вдоль побережья Каспийского моря. Для расчета относительной влажности над акваторией моря использовался метод множественной регрессии по данным об интегральном содержании водяного пара в атмосфере и скорости приводного ветра, полученным по результатам зондирования СВЧ-датчиков. Полученное пространственно-временное распределение испарения с поверхности Каспийского моря хорошо согласуется результатами расчетов других исследователей и натурных измерений. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-64871-а).

## Введение

Испарение с водной поверхности является основной расходной составляющей водного баланса Каспийского моря [1]. До настоящего времени метода прямого измерения испарения с поверхности морей не разработано. Существует два основных подхода к расчету испарения с водной поверхности. Первый основывается на уравнениях водного и теплового баланса, в которых испарение рассматривается как остаточный член, а остальные члены уравнения определяются из наблюдений или путем теоретических расчетов. Расчет испарения с поверхности Каспийского моря с использованием метода теплового баланса имеет ограничения в связи с пространственной неоднородностью процесса теплообмена, обусловленной огромными размерами моря. Более достоверной оценкой величины испарения является его вычисление из уравнения водного баланса. Возможности балансовых методов определения испарения ограничены предположением о пространственной однородности этой величины, что в большинстве случаев не выполняется.

Второй подход к вычислению испарения – это диффузионный метод, сутью которого является применение эмпирических и полуэмпирических формул, описывающих диффузию водяного пара в приводном слое атмосферы. Этот подход позволяет получить значения истинного испарения. Он дает представление о пространственном изменении величины испарения, позволяет изучить его региональные особенности. Недостатком этого подхода является использование для расчетов простых полуэмпирических формул, не учитывающих сложную природу процесса взаимодействия моря с атмосферой.

В большинстве эмпирических формул используется закон Дальтона [2, 3], по которому испарение ( $E$ ) пропорционально разности ( $\Delta e$ ) максимального парциального давления водяного пара ( $e_n$ ) при температуре испаряющей поверхности и парциального давления ( $e_h$ ) на высоте  $h$  над водной поверхностью  $E = K_c \Delta e = K_c (e_n - e_h)$ , где  $K_c$  – коэффициент массоотдачи, который находится по данным лабораторных и/или натурных экспериментов. Он имеет эмпирическую зависимость от метеорологических параметров: температуры воздуха

и воды, влажности воздуха и скорости приводного ветра. Применяющиеся в настоящее время эмпирические формулы по-разному учитывают эти и другие факторы в коэффициенте  $K_c$ , в чем и заключается отличие их друг от друга. Самые простые из них учитывают только влияние ветра или температуры воздуха, более сложные включают в себя характеристики аэродинамических поверхностей, турбулентность атмосферы, явления разбрызгивания, вертикальные профили ветра и влажности, температурную стратификацию атмосферы. Подробно возможность их использования для расчетов испарения с водной поверхности рассмотрена в работе [4].

### Современное состояние задачи расчета испарения

Основная проблема расчета испарения с акватории Каспийского моря заключается не столько в том, насколько та или иная формула физически правильно описывает процесс испарения, а в том, как получить надежные данные метеорологических наблюдений над акваторией моря, необходимые для расчетов. В силу огромных размеров Каспия данные наблюдений на береговых станциях не подходят для расчетов на акватории моря (не репрезентативны). Согласно методике, представленной в работе [5], выбираются опорные метеостанции, т.е. станции, данные которых репрезентативны для той или иной части акватории Каспийского моря. По ним и для всего моря определяются коэффициенты межгодовой изменчивости испарения. Затем с учетом нормы испарения, полученной из уравнений водного баланса, рассчитываются величины испарения для каждого месяца и года. При этом неизвестно, насколько норма испарения соответствует действительности. Существенное сокращение сети метеостанций после 1985 года ограничивает применение данной методики в настоящее время.

В работах [6, 7] приведены первые результаты расчета испарения с поверхности Каспийского моря по данным о температуре воздуха и воды, влажности воздуха и скорость приводного ветра проекта NCEP/NCAR «Reanalysis» (Реанализ) Национального центра прогноза состояния окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction — NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research — NCAR) [8, 9]. Эти данные содержат реконструированные данные основных метеорологических параметрах для всей поверхности Земли при равномерном покрытии за период с 1948 по настоящее время.

Сравнение данных реанализа с результатами измерений температуры воздуха на высоте 2 м, скорости ветра на высоте 10 м и температуры воды показало, что для измерений на станции о. Тюлений, которые можно считать за наблюдения в открытом море, совпадение данных температуры воздуха и скорости ветра удовлетворительное. Для температуры воды данные реанализа оказались заниженными на 2–4°C по сравнению с данными измерений. Сравнение с данными береговых метеостанций (например, Махачкала) показало, что значения температуры воздуха и скорости ветра по данным реанализа оказались также заниженными соответственно на 3–5°C и 2–3 м/с [6, 7].

Несмотря на то, что первые результаты расчетов испарения с использованием данных реанализа показали достаточно хорошее соответствие с данными расчетов по другим методикам, однако, по нашему мнению, они имеют определенное ограничение в применении.

Во-первых, пространственного разрешения 2.5x2.5 этих данных для акватории Каспийского моря и прибрежных территорий явно недостаточно. Только 8 точек сетки попадают непосредственно на акваторию моря: 4 в Южный Каспий и по 2 в Центральный и Северный соответственно. Поэтому в первую очередь недостаток этих данных скажется при использовании температуры поверхности моря.

Во-вторых, удовлетворительное соответствие температуры воздуха и скорости ветра данных реанализа и данных метеостанции о. Тюлений, по-нашему мнению, обусловлено скорее

всего тем, что при интерполяции данных модельных расчетов в точку, координаты которой соответствуют местоположению этой метеостанции, использовались три точки из массива реанализа, расположенных непосредственно на акватории моря. В случае метеостанции Махачкала – ни одной.

В-третьих, сравнение абсолютной влажности воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью данных реанализа с данными метеонаблюдений в данных исследованиях не проводилось.

В-четвертых, согласно результатам исследований, представленных в работах [10, 11], для района Каспийского моря в целом наблюдается уменьшение среднегодовых скоростей ветра в период с 1960 по 1990 гг., характеризующееся в среднем линейным трендом 0.3–0.4 м/с за десять лет. В силу того что значения скорости ветра по данным реанализа по сравнению с измерениями метеостанций оказались заниженными на 2–3 м/с, то и линейный тренд также будет занижен. Это в свою очередь может привести к ошибкам в расчетах межгодовой изменчивости испарения с поверхности Каспийского моря.

По этой причине для расчета испарения предлагается использовать данные дистанционного зондирования совместно с данными измерений на береговых станциях (рис. 1).

### Использованные данные и методика расчетов

Как показали результаты исследования пространственно-временной изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) по данным дистанционного зондирования [12–14], поле ТПМ Каспийского моря имеет достаточно сильную сезонную и межгодовую изменчивость, что в свою очередь оказывает сильное влияние на испарение с поверхности моря. Традиционные измерения ТПМ, проводимые с судов, не могут адекватно отразить весь спектр изменчивости этого параметра,

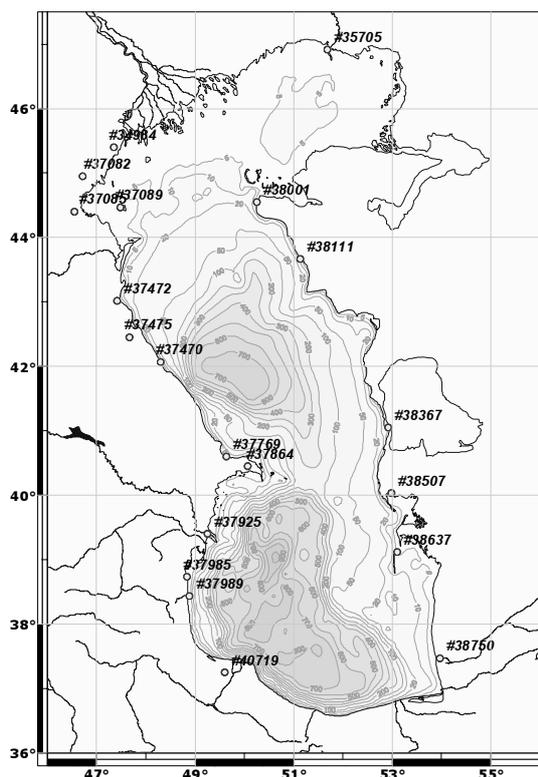


Рис. 1. Расположение метеостанций, информация которых использовалась в расчетах

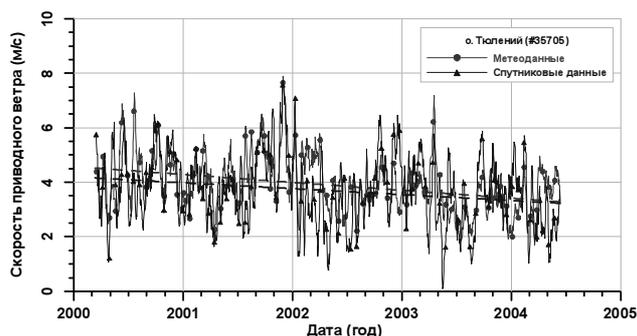


Рис. 2. Сравнение среднесуточных скоростей приведенного ветра по данным метеостанции о. Тюлений (круг) и данным СВЧ-датчика SSM/I (треугольник)

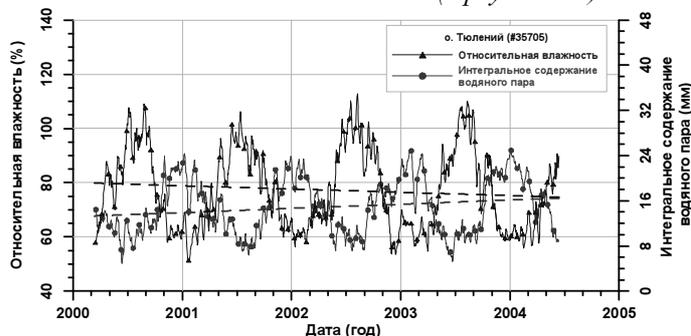


Рис. 3. Сравнение среднесуточных относительной влажности (%) по данным метеостанции о. Тюлений (треугольник) и интегрального содержания водяного пара (мм) по данным СВЧ-датчика SSM/I (круг)

так как они непостоянны вследствие зависимости от маршрутов судов. Поэтому для расчета испарения с поверхности Каспия предлагается использовать данные ТПМ проекта GHRSSST (GODAE High Resolution SST). Эти данные представляют собой объединенные измерения ТПМ в ИК-диапазоне (датчик AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer) и СВЧ-диапазоне (датчик ATSR – Along-Track Scanning Radiometer) с разрешением по пространству  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  и по времени одни сутки. Точность измерения ТПМ обоими датчиками не менее  $0.4^{\circ}\text{K}$  с пространственным разрешением 1 км для ATSR и 2.2 км для AVHRR [15].

Поле скорости приводного ветра над акваторией Каспийского моря также имеет достаточно сильную пространственно-временную изменчивость [5]. По этой причине данные наблюдений на береговых станциях не подходят для расчетов по всей акватории моря. Как альтернативный источник информации предлагается использовать данные о скорости приводного ветра, полученные по результатам дистанционного зондирования датчика SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) в СВЧ-диапазоне. Эти данные также представлены в виде полей на регулярной сетке с пространственным разрешением  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  и осреднением по времени за сутки, три дня, неделю и месяц [16]. Точность расчета скорости приводного ветра по этим данным не менее 0.7 м/с, что гораздо выше, чем несоответствие данных реанализа и измерений на метеостанциях, о чем говорилось выше (рис. 2).

Поле атмосферного давления и температуры воздуха над акваторией Каспийского моря предлагается рассчитывать по данным прибрежных метеостанций. В наших расчетах мы использовали данные 19 метеостанций, расположение которых представлено на рис. 1.

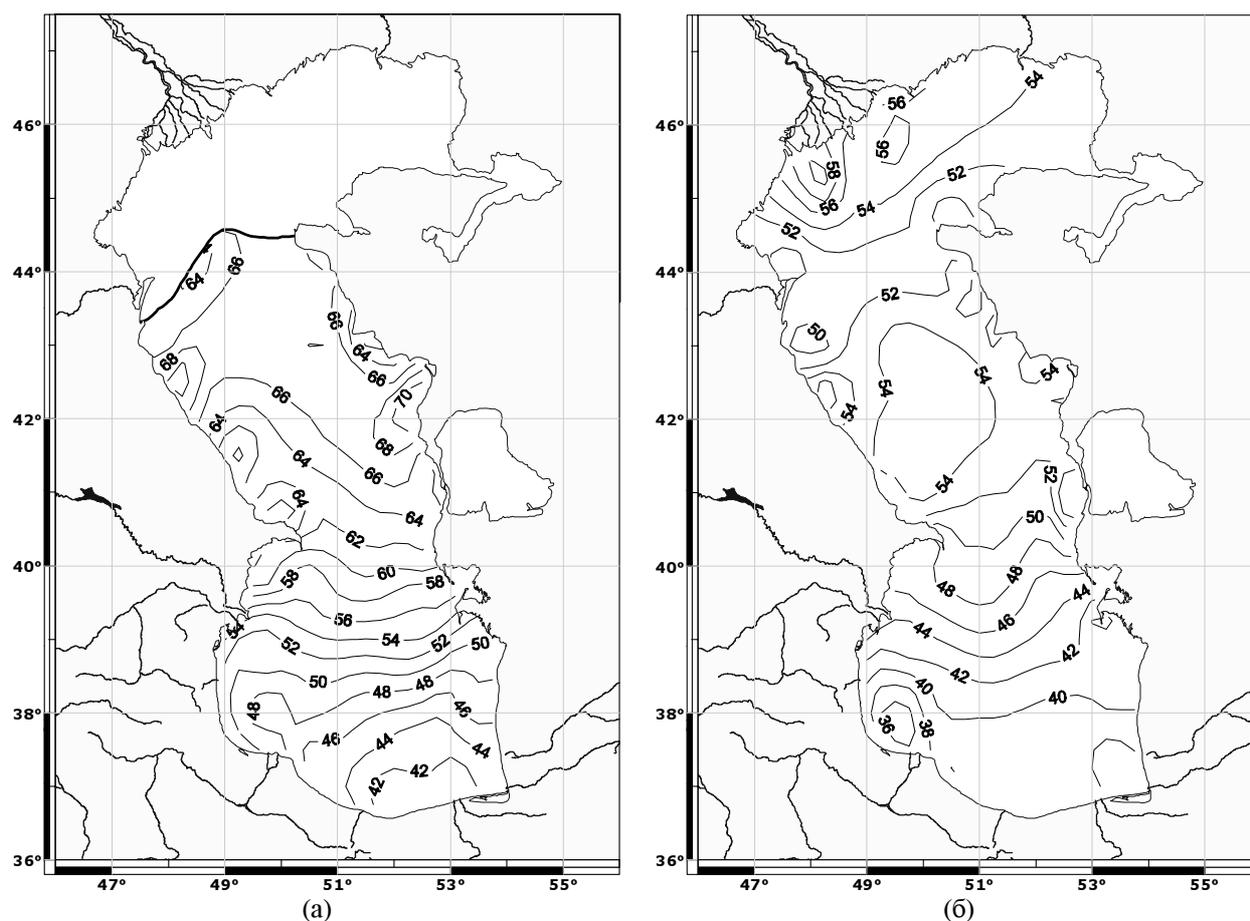


Рис. 4. Карты средних многолетних сумм испарения с поверхности Каспийского моря в мм слоя, полученные по формуле за январь (а), апрель (б), июль (в), октябрь (г) и за год (д)

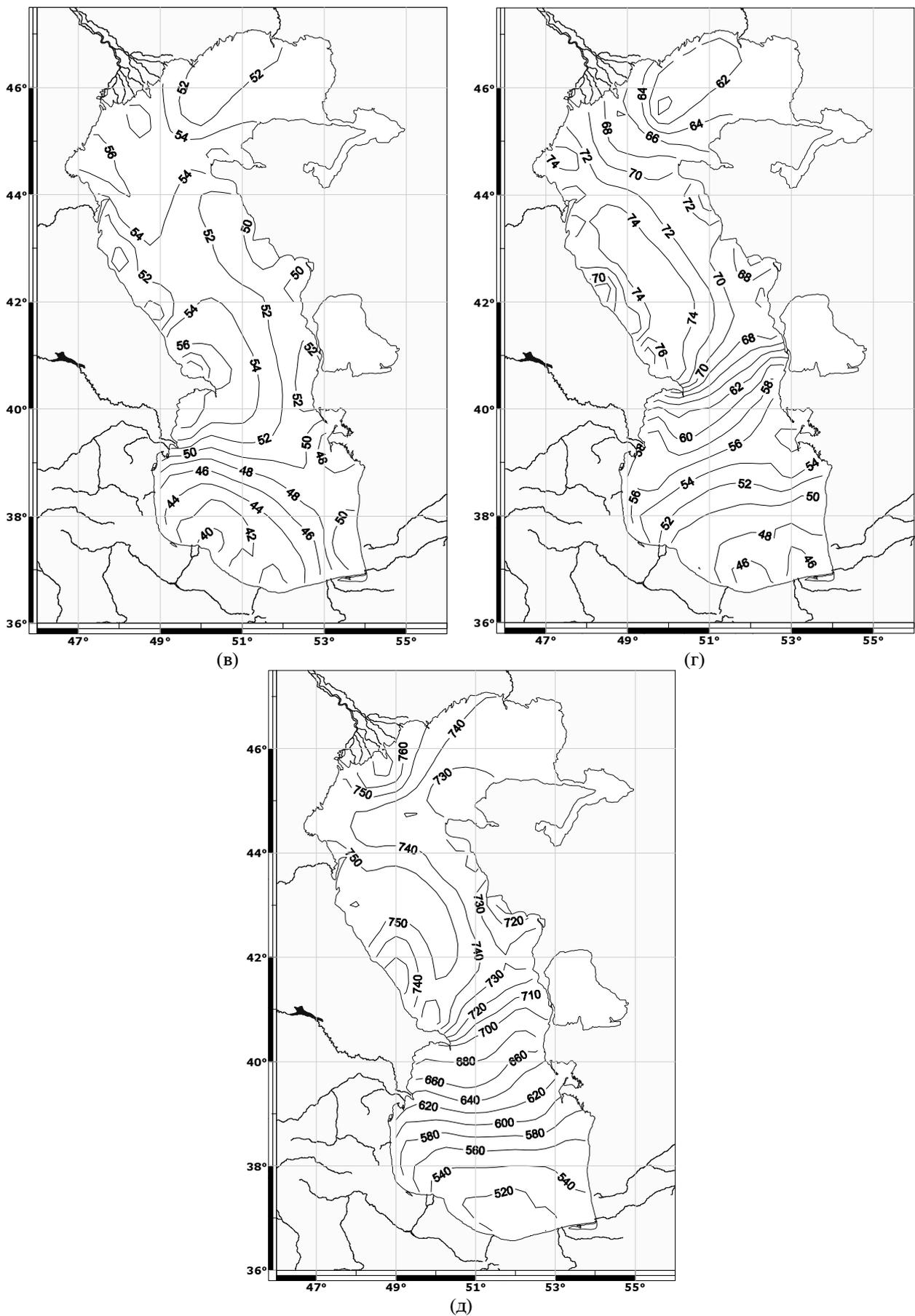


Рис. 4. (продолжение) Карты средних многолетних сумм испарения с поверхности Каспийского моря в мм слоя, полученные по формуле за январь (а), апрель (б), июль (в), октябрь (г) и за год (д)

Особенно остро встает вопрос о расчетах относительной влажности над акваторией моря. Сравнительный анализ взаимосвязи относительной влажности с интегральным содержанием водяного пара в атмосфере, рассчитанным по данным СВЧ-датчика SSM/I (рис. 3). Анализ показал, что данные дистанционного зондирования можно использовать для расчета относительной влажности. Для этого использовался метод множественной регрессии, когда относительная влажность рассчитывается по данным об интегральном содержании водяного пара и скорости ветра, которые определялись по данным дистанционного зондирования в СВЧ-диапазоне.

На основании вышесказанного определились все источники данных, необходимых для расчета испарения с поверхности Каспийского моря независимо от выбора формулы расчетов. В наших исследованиях мы проводили расчеты, как и в работе [6, 7], по формуле Самойленко [7].

### Полученные результаты и их обсуждение

Для Каспийского моря по расчетам с помощью формул были получены величины испарения, колеблющиеся в пределах 620–810 мм, а в среднем море теряло до 700 мм слоя воды в год. Величина межгодовой изменчивости испарения составляла в среднем около 50 см слоя воды. Отклонения годового значения от многолетней нормы достигали  $\pm 27\%$  или  $\pm 20$  см.

Значительная меридиональная протяженность моря и различные климатические условия приводят к существенным различиям в интенсивности процессов испарения, так, например, они наиболее развиты в Северном Каспии, где ежегодно испаряется в среднем 740 мм слоя воды. С поверхности всего моря с июня по декабрь испаряется около 70% годового объема испарившихся вод, а с поверхности Северного Каспия с мая по сентябрь — 75% годового объема. Минимальные значения отмечаются в зимние месяцы и в начале весны (с января по март), максимальные — летом. В районах Среднего и Южного Каспия процессы испарения наиболее развиты конце лета и начале осени (рис. 4).

### Заключение

Проведенный сравнительный анализ позволил сделать ряд выводов относительно возможности использования данных спутниковой альтиметрии в исследуемых морях. Результаты этой работы будут учитываться при дальнейшей реализации проекта ALTICORE, направленного на улучшение качества данных спутниковой альтиметрии в прибрежной зоне европейских морей. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-05-64871-а.

### Литература

1. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука. 1987. 89 с.
2. Бабкин В.И. Испарение с водной поверхности. — Л.: Гидрометеиздат, 1984, 78 с.
3. Браславский А.П., Остроумова Л.П. Оценка точности современных формул, предложенных для расчета слоя испарения с поверхности водных объектов // Труды КазНИГМИ Госкомгидромета. М.: Гидрометеиздат, 1991. Вып. 107, с. 16–45.
4. Федюшин И.А. Определение потерь воды на испарение с поверхности оз. Балхаш различными методами // Сборник работ Алма-Атинской ГМО, 1981. Вып. 9. С. 21–25.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Проект «Моря». Том VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева и А.А. Керимова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 359 с.
6. Трубецкова М.Д., Филимонова М.К. Об оценке испарения с поверхности Каспийского моря в современный период // Труды международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе». Москва, 19-20 октября 2006 г. М.: ИВП РАН, 2006. С. 79-84.

7. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события / Отв. ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука, 2007. 380 с.
8. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40 – Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V.77. № 3. P. 437-471.
9. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bulletin of the American Meteorological Society. 2001. V.82. № 2. P. 247-267.
10. Панин Г.Н., Дзюба А.В. Современные изменения вектора скорости ветра и интенсивности испарения с поверхности Каспийского моря // Водные ресурсы, 2003. №2. С. 198–207.
11. Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 356 с.
12. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря // Океанология, 2004. Т. 44. № 5. С. 645–659.
13. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Шеремет Н.А. Структура апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия (по спутниковым наблюдениям) // Исследование Земли из космоса, 2005. № 4. С. 76–85.
14. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. and Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability // The Caspian Sea Environment / Eds. Kostianoy A.G. and Kosarev A.N. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. 2005. P. 59–81. doi:10.1007/698\_5\_004
15. Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I., Beggs H., Poulter D.J.S, Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., R. Evans, Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H. and Rayner N. The Global Ocean Data Assimilation Experiment High-resolution Sea Surface Temperature Pilot Project // Bull. Am. Met. Soc., 2007, Vol. 88. №8, 1197–1213. doi: 10.1175/BAMS-88-8-1197
16. Halpern D., Hollingsworth A., Wentz F.J. ECMWF and SSM/I global surface wind // J. Atmos. Oceanic Technol. 1993. Vol. 10. P. 779–788.