

Л.Н.Репетин\*, В.В.Долотов\*\*,  
А.Е.Липченко\*, М.М.Липченко\*

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

\*\* *Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

**МЕТОД РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ  
И РАСТВОРЕННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ,  
ВЫПАДАЮЩИХ НА АКВАТОРИЮ ЧЕРНОГО МОРЯ,  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
И ОПЕРАТИВНОЙ ИНТЕРНЕТ-ИНФОРМАЦИИ**

Представлены методика оперативных расчетов количества атмосферных осадков и растворенных в них химических веществ на поверхность Черного моря, описание программного расчетно-аналитического комплекса и банка данных для автоматизированного приема Интернет-информации с результатами модельных расчетов количества осадков над Черным морем, усвоения натуральных береговых и судовых данных, а также для представления итоговых результатов в виде таблиц и карт пространственного распределения количества осадков и растворенных химических веществ за каждый дождь, сутки, месяц. Приводятся результаты сравнения с традиционным методом модульных коэффициентов.

Учитывая возрастание антропогенной нагрузки на экосистемы морей, черноморские государства в рамках международной экологической программы *Black Sea Ecosystem Recovery Project (BSERP)*, осуществляемой при поддержке Глобального Экологического Фонда (*GEF*), объединяют свои усилия для проведения комплексных исследований загрязнения вод Черного моря химическими элементами. В частности, в рамках предварительного этапа международной программы *RER/01/G33 «Control of eutrophication, hazardous substances and related measures for rehabilitating the Black Sea ecosystem» (Atmospheric Deposition)*, в период с ноября 2003 г. по май 2004 г. силами мореведческих организаций Украины и Болгарии проведен экспериментальный мониторинг атмосферных осадков и растворенных в осадках биогенных и некоторых других веществ [1]. Для реализации мониторинга, прежде всего, было необходимо разработать оптимальную систему сбора, обработки данных, методологию расчета количества атмосферных осадков и содержащихся в них веществ с целью оценки количества их поступления на всю акваторию Черного моря.

До последнего времени в основу расчетов количества осадков, выпадающих на поверхность Черного моря (в основном для оценок водного баланса), была положена гипотеза о пропорциональности хода осредненных модульных коэффициентов (отношение суммы осадков данного года к среднему многолетнему значению) на опорных береговых станциях и в открытом море [2]. На основании данных многолетних береговых наблюдений и весьма ограниченных судовых измерений осадков были построены средние месячные и годовые карты сумм осадков. По этим картам были опреде-

© Л.Н.Репетин, В.В.Долотов, А.Е.Липченко, М.М.Липченко, 2005

лены площади каждой зоны изогийет (планиметрированием) и вычислены средние многолетние величины сумм атмосферных осадков, выпавших на поверхность Черного моря. Графическим анализом изменчивости атмосферных осадков были отобраны 5 опорных станций: Одесса, Севастополь, Феодосия, Новороссийск, Потти, осредненные значения сумм осадков которых (по мнению авторов [2]) наилучшим образом отражают внутригодовые изменения осадков над морем. Таким образом, из-за отсутствия данных по западному и южному побережьям Черного моря, в качестве опорных точек выбирались станции только на северном и восточном побережьях Черного моря. Сопоставление многолетних данных, рассчитанных с использованием модульных коэффициентов, с расчетами количества осадков по методу *Re*-анализа, которые были выполнены Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) [3], показало якобы заниженные для условий Черного моря результаты [4] по сравнению с данными, опубликованными в [2] и [4]. Однако следует учесть, что авторы этих двух работ использовали только измерения береговых станций и не располагали данными диагностических и прогностических расчетов осадков над водными акваториями, полученными с помощью апробированных глобальных численных моделей. В данной работе применен комплексный метод оценки количества осадков над Черным морем, учитывающий результаты оперативных расчетов по модели *Global Forecast System (GFS) by National Center for Environmental Prediction* (США), натурных данных измерений на береговых и судовых станциях, а также детальный синоптический анализ каждого дождя. Методических рекомендаций по расчету количества химических веществ, выпадающих с осадками на поверхность Черного или других морей, в опубликованных материалах нами не найдено. Априори очевидно, что достоверность таких расчетов будет зависеть от качества отбора и химических определений проб атмосферных осадков, от точности оценки пространственного распределения количества осадков над морем и корректности метода экстраполяции натурных данных на удаленные от берега районы моря. Решение поставленной задачи позволит создать инструмент для оценки роли атмосферных осадков в балансе химического загрязнения и уточнения величин пресного баланса Черного моря.

**Использованные материалы.** Для апробирования расчетов использовались данные измерений количества атмосферных осадков на станциях Государственной гидрометеорологической службы Украины: Одесса, Одесса-порт, Хорлы, Севастополь, Херсонесский маяк, Ялта, Феодосия и Опасное.

Отбор проб атмосферных осадков и определение их химического состава производились на северном побережье моря в Севастополе и Одессе (Украина), а также на западном побережье Черного моря в порту Варна (Болгария). В данной работе результаты, полученные в Варне, не использовались. Пробы атмосферных осадков анализировались в основном на содержание анионов  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ионов  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $H_2PO_4^{2-}$  и *pH*. Пробные эксперименты по измерению количества осадков, отбору и анализу проб осадков в открытых районах моря были проведены также на НИС «Академик» (Болгария) и НИС «Проф. Водяницкий» (Украина).

С целью получения оперативных данных модельных расчетов количества осадков ежедневно, в течение семи месяцев, проводился регулярный прием информации открытых метеорологических Интернет-сайтов. Для си-

ноптического анализа привлекались данные европейских гидрометцентров *Bracknell, Meteo Franse, Symbach, SKIRON*, Московского и Киевского гидрометцентров. Таким образом, основу исходной информации составили данные фактических измерений количества осадков, их химического состава, полученные на береговых станциях, данные модельных расчетов полей количества осадков над акваторией Черного моря (*GFS*) и результаты синоптического анализа эволюции осадкообразующих процессов над бассейном Черного моря. В итоге была создана база данных для 173 суток с осадками, которая позволила получить предварительные оценки количества осадков и химических веществ, выпавших на поверхность Черного моря за период экспериментального мониторинга.

**Общая концепция.** Основная идея заключалась в разработке компьютерной системы, способной в автоматическом режиме или при участии пользователя принимать Интернет-карты распределения количества осадков, выпадающих на различные регионы Черного моря, с последующей оцифровкой на основе цветовой или иной шкалы с целью создания соответствующего банка данных. Для этого необходимо было предусмотреть возможность загрузки натуральных данных количества осадков и их химического состава, а также возможность корректировки расчетных данных результатами натуральных береговых измерений и их экстраполяции на районы открытого моря. Для количественной оценки поступления в воды Черного моря химических веществ необходимо располагать распределенными по регионам данными о содержании в осадках растворенных веществ за каждый случай дождя, определенными по единой методике. Помимо этого известно, что содержание растворенных веществ в осадках не постоянно даже в течение одного дождя вследствие эффекта «вымывания» растворенных веществ из облачности со скоростью, характерной для каждого из них. Кроме того, концентрация химических веществ в осадках зависит не только от уровня загрязнения атмосферы в том или ином регионе, но и от количества и интенсивности выпадения осадков. Учитывая основное назначение программы как расчетного и аналитического инструмента, предполагалось разработать удобные средства для пространственного и статистического анализа результатов расчетов.

Разработанный компьютерный расчетно-аналитический комплекс способен:

- усваивать информацию о количестве осадков, выпадающих на берега и поверхность Черного моря;
- усваивать информацию о концентрации биогенных и других растворенных в атмосферных осадках химических веществ;
- автоматически оцифровывать и усваивать в банке данных (БД) информацию Интернет-сайтов о количестве осадков, выпадающих на акваторию Черного моря;
- рассчитывать:
  - средние значения слоя осадков (в мм) за каждые сутки и каждый месяц;
  - объёмы осадков (в км<sup>3</sup>) каждого дождя (снега) по отдельным заданным квадратам и акватории Черного моря в целом;
  - суммарные величины осадков на поверхность всего моря за каждые сутки и за каждый месяц;

– количество выпадающего с осадками каждого из определяемых растворенных веществ (т) для каждого суток с дождем и месяца в целом;

- производить в автоматическом режиме построение таблиц с результатами расчетов и схем пространственного распределения каждого из расчетных параметров по площади моря для каждого суток и месяца в целом.

**Основные принципы и методика расчетов.** На основании рассчитанных с помощью модели *GFS* карт пространственного распределения количества осадков определялись величины слоя осадков для каждого из 95 квадратов заданной регулярной сетки акватории Черного моря [2], традиционно используемой для климатических расчетов гидрометеорологических параметров (рис.1). Полученные значения корректировались по данным натурных измерений на береговых станциях. С учетом данных о площадях квадратов [2], покрытых осадками, выполнялся расчет общего количества выпавших осадков. На основании данных береговых лабораторий о концентрациях растворенных в осадках химических веществ, выполнялся расчет количества биогенных и других веществ, выпавших на акваторию моря за сутки или месяц.

На предварительном этапе исследований для этого использовался наиболее простой прием, когда общая масса поступления химических элементов на площадь моря рассчитывалась по формуле:

$$M=h \cdot C \cdot S, \quad (1)$$

где  $M$  – масса вещества (т),  $h$  – количество осадков (мм),  $C$  – концентрация вещества в осадках ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ ),  $S$  – площадь поверхности ( $\text{км}^2$ ). При этом использовались измерения концентраций только имевшихся в нашем распоряжении береговых станций Севастополь и Одесса. Расчеты поступления каждого химического вещества на всю площадь моря производились, исходя из предположения, что концентрация исследуемых веществ в атмосферных осадках в районе береговых пунктов отбора проб близка к их концентрациям в открытой части моря. Реализация этих основных принципов в программе выполнена в следующей последовательности.

Анализ Интернет-сайтов, предоставляющих информацию об атмосферных осадках над Черным морем, позволил выбрать оптимальный, характеризующийся достаточным разрешением, отсутствием помех и регулярностью обновления информации: <http://www.westwind.ch>. Карты этого сайта основаны на авиационной компьютерной модели (AVN) глобальной прогностической системы *GFS* и предоставляют прогностические и текущие (анализ) данные полей метеопараметров над Европой. Пример увеличенного фрагмента карты про-

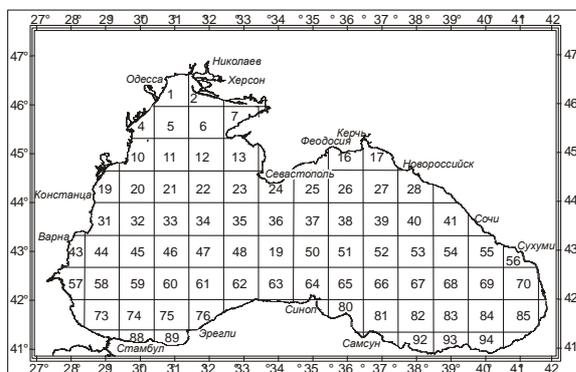
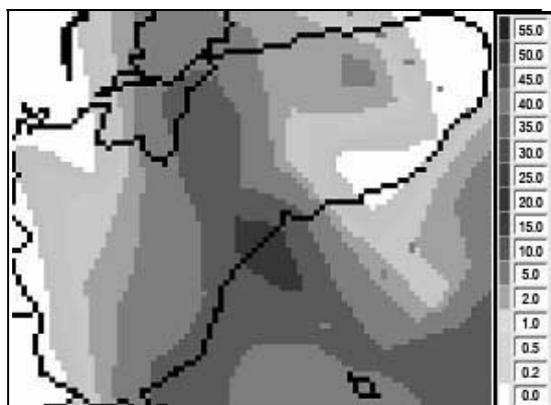


Рис. 1. Схема условных квадратов Черного моря [2].



Р и с . 2 . Точечное представление карты поля количества осадков (мм) над Черным морем.

рем на карте Европы, невелика, количество точек изображения, приходящихся на этот регион, значительно превышает необходимый уровень и составляет  $86 \times 74 = 6364$ . Отсеивая точки, лежащие за пределами контура Черного моря, получаем информационный массив в количестве 2266 точек. С целью определения соответствия точек карты (рис.2) квадратам стандартной сетки (рис.1) была построена совмещенная схема, с помощью которой определялись точки (пиксели изображения), относящиеся к каждому квадрату, с целью последующего их осреднения в рамках этих квадратов. Средние для квадрата значения и использовались для дальнейших расчетов.

**Модуль приема картографической информации** из сети Интернет предназначен для автоматического вызова Интернет-сайта и загрузки карты количества осадков. Все карты для последующей оцифровки помещались в отдельный каталог и названы по датам приема, например «050304-1.bmp», где первая цифра соответствует дате (день, месяц, год), последняя цифра – номеру (времени) принятой карты (1 – за 00 ч, 2 – за 6 ч, 3 – за 12 ч, 4 – за 18 ч) в течение каждых суток. В режиме автоматического приема в файл карты получают названия автоматически.

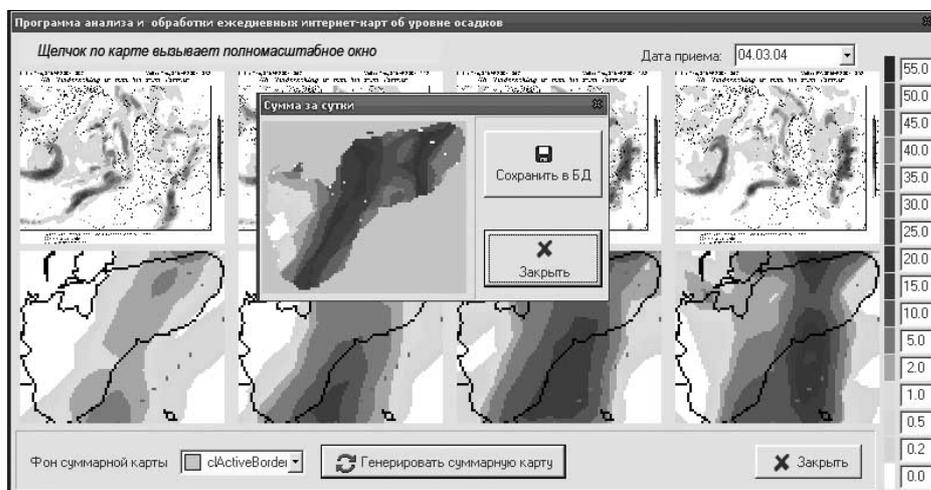
**Модуль оцифровки карт** является центральным модулем программы, поскольку именно он обеспечивает пополнение БД – основного хранилища данных о количестве осадков. Он представляет собой окно, в которое загружаются предварительно сохраненные 4 карты, в соответствии с выбранной пользователем датой (рис.3).

С помощью специальной команды программа генерирует из нескольких схем (от 1 до 4) карту суммарных осадков за сутки, данные которой по следующей команде автоматически включаются в БД в оцифрованном виде.

**Структура БД** организована в виде традиционного для операционной системы дерева каталогов, поименованных по годам и содержащих файлы следующих типов:

- 1) файл количества осадков с данными по отдельным квадратам акватории Черного моря для каждого месяца, номер которого входит в состав имени файла, например, «Prec11.dat»;
- 2) файл концентраций растворенных в осадках веществ, названный

странственного распределения количества осадков (в оттенках серого цвета) с районом Черного моря представлен на рис.2. Карты рассчитываются 4 раза в сутки, и на их основе имеется возможность создать банк данных по осадкам с интервалом в 6 ч. Распределение величин количества осадков по площади моря соответствует цветовой шкале карты. Анализ структуры рисунка показал, что, несмотря на то, что площадь, занимаемая Черным морем



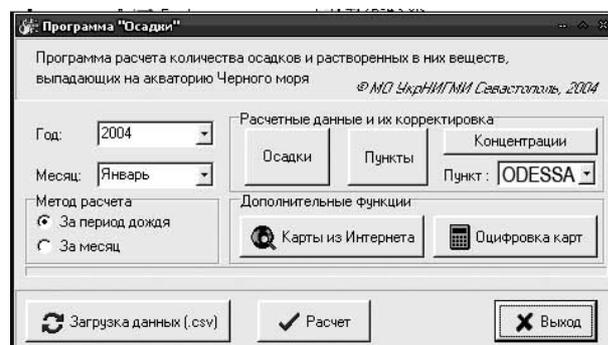
Р и с . 3 . Интерфейс модуля оцифровки.

произвольно, например, по наименованию пункта наблюдения, также с указанием месяца, например, «Sevastopol11.dat» или «Odessa03.dat»;

3) файл соответствия расчетных квадратов моря пунктам измерения концентраций растворенных веществ, имеющий в названии префикс «Cells», а также номер месяца, например, «Cells01.dat».

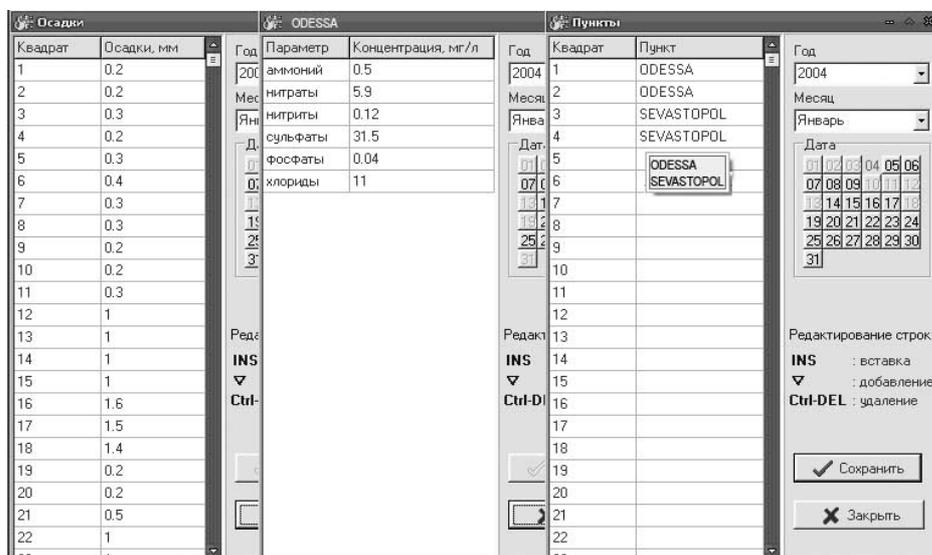
На основании данных базы о распределении количества осадков по квадратам для каждого случая дождя рассчитываются объемы осадков, выпавших в каждом квадрате, с учетом его площади и общая сумма осадков, выпавших на всю акваторию Черного моря. Расчет можно выполнять либо для конкретной даты, либо для заданного месяца, который выбирается пользователем (рис.4). В обоих случаях результат выдается в виде соответствующей таблицы.

Для загрузки данных о концентрациях растворенных в осадках химических веществ используется формат <.CSV> (*comma separated value* – числа разделенные знаком «точка с запятой»), поскольку он является универсальным для передачи данных в текстовом формате и удобен для преобразования файлов из формата *MS Excel*. Использование в расчетах данных о концентрациях выполняется по следующему алгоритму. При наличии файла «Cells??.dat» определенного месяца данные для каждого квадрата автоматически извлекаются из файла, соответствующего наименованию пункта, указанного в файле. При отсутствии последнего или при отсутствии в нем данных для какого-либо из квадратов данные берутся из файла с наименованием пункта, указанного пользователем, для каждого региона. При этом во всех случаях при отсутствии



Р и с . 4 . Основное окно программы.

автоматически извлекаются из файла, соответствующего наименованию пункта, указанного в файле. При отсутствии последнего или при отсутствии в нем данных для какого-либо из квадратов данные берутся из файла с наименованием пункта, указанного пользователем, для каждого региона. При этом во всех случаях при отсутствии



Р и с . 5 . Форма представления диалоговых окон редактирования данных БД по количеству осадков, концентрациям растворенных веществ и пунктам наблюдения за химическим составом осадков.

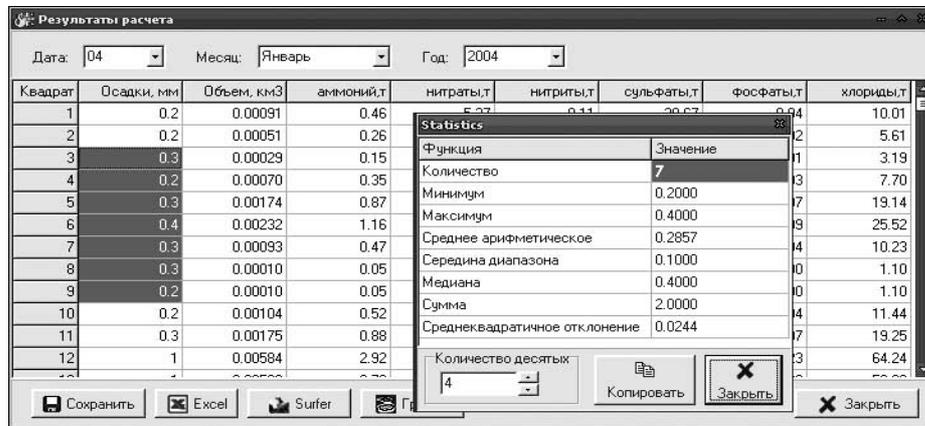
данных за выбранную дату программа выбирает ближайшую к ней, о чем уведомляет пользователя.

Редактирование расчетных данных на основании натуральных измерений береговых, островных и судовых станций, корректировка значений концентраций химических веществ и распределение расчетных квадратов сетки по зонам пунктов измерения химического состава осадков производится в соответствующих диалоговых окнах (рис.5).

В окне итоговых результатов представлены расчетные величины атмосферных осадков и химических выпадений по каждому квадрату, средние и суммы для всего моря. В этом же окне предусмотрена возможность получения основных статистических характеристик по выделенному параметру и диапазону квадратов (рис.6). Используя списки дат, месяцев и лет, пользователь может пересчитывать данные в соответствии с выбором. Результат расчета нажатием определенной клавиши можно перенести в офисную программу *MS Excel*, сохранить в текстовом файле или построить пространственное распределение любого, курсором отмеченного в окне, рассчитанного параметра с использованием программы *GS Surfer* фирмы *Golden Software Inc*.

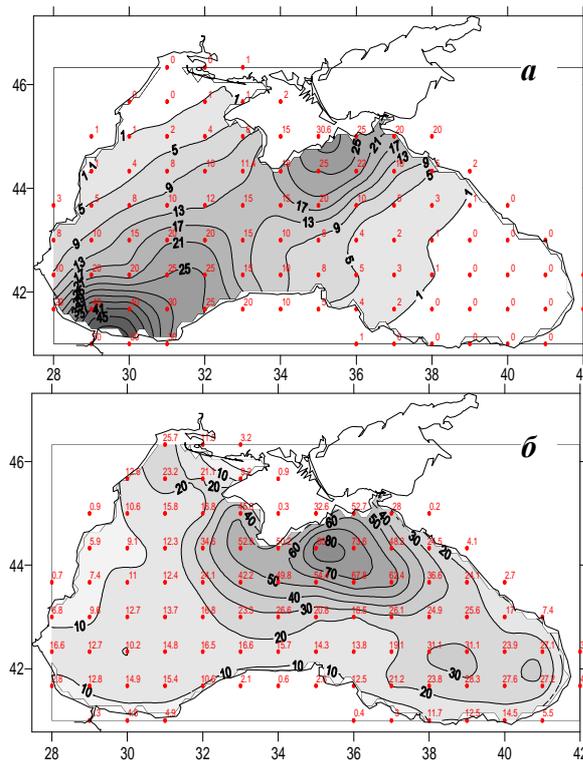
Последняя включает в себя высокоразвитые алгоритмы интерполяции и пространственного анализа географических данных. При этом результаты отображаются либо непосредственно в окне программы *Surfer*, что позволяет выполнять любые модификации построенного распределения либо в окне **модуля построения карт** аналитического блока системы.

В качестве примеров на рис.7 представлены построенные в автоматическом режиме карты распределения по акватории Черного моря, суточного количества осадков, выпавших 22 января 2004 г. и месячного количества фосфатов, выпавших в январе 2004 г. На картах оставлены расчетные значения средних для каждого квадрата величин.



Р и с . 6 . Результирующее расчетное окно программы.

**Результаты расчетов** количества осадков (слой в мм и объем в км<sup>3</sup>), а также любого определяемого в осадках растворенного химического вещества (т) можно автоматически представить в виде сводных таблиц формата *MS Excel*, рассчитанных для каждого суток или каждого месяца. Пример такой таблицы с данными для дождя 11 ноября 2003 г. представлен в табл.1.



Р и с . 7 . Пример построения пространственного распределения суточного количества осадков (мм) за 22 января 2004 г. (а) и месячного количества фосфатов (т), выпавших на поверхность Черного моря в январе 2004 г. (б).

какой таблицы с данными для дождя 11 ноября 2003 г. представлен в табл.1.

В течение 7 месяцев экспериментального мониторинга с помощью разработанного расчетно-аналитического комплекса были собраны и обработаны в общей сложности более 700 карт для 173 суток с осадками, выпадавшими на берега и акваторию Черного моря. Расчеты количества осадков были выполнены по различным методикам и результаты показали существенные отличия. При этом сравнивались:

1) месячные суммы осадков (мм) над морем, рассчитанные по изложенному методу на основе данных численного моделирования (*GFS*), откорректированных по информации береговых станций и с помощью комплексного синоптического анализа;

2) месячные суммы осад-

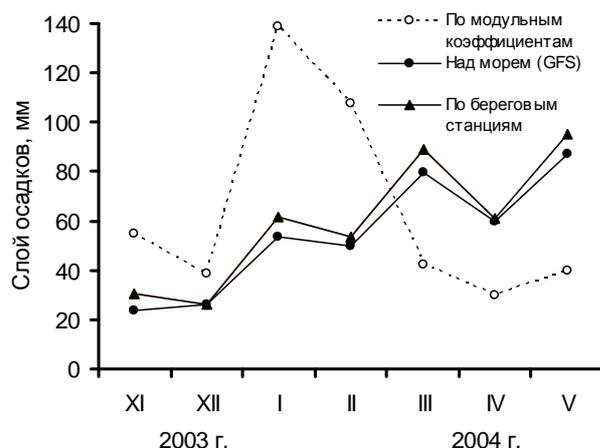
Т а б л и ц а 1. Фрагмент результатов расчета осадков и выпавших с ними растворенных веществ в течение суток 11 ноября 2003 г.

квadrat	слой, мм	объем, км <sup>3</sup>	$NH_4^+$ , т	$NO_2^-$ , т	$NO_3^-$ , т	$SO_4^{2-}$ , т	$PO_4^{3-}$ , т	$Cl$ , т
1	5	0,0227	6,81	29,51	0,91	45,4	3,4	13,6
2	5	0,01268	3,8	16,48	0,51	25,36	1,9	7,61
3	5	0,00478	1,43	6,21	0,19	9,56	0,72	2,87
4	5	0,01757	5,27	22,84	0,7	35,14	2,64	10,5
89	2	0,00394	1,18	5,12	0,16	7,88	0,59	2,36
90	2	0,00027	0,08	0,35	0,01	0,54	0,04	0,16
91	6	0,00629	1,89	8,18	0,25	12,58	0,94	3,77
92	8	0,02618	7,85	34,03	1,05	52,36	3,93	15,7
93	8	0,02348	7,04	30,52	0,94	46,96	3,52	14,1
94	9	0,02988	8,96	38,84	1,2	59,76	4,48	17,9
95	10	0,01222	3,67	15,89	0,49	24,44	1,83	7,33
средн.	7,15	0,03	9,7	42,04	1,29	64,67	4,85	19,4
Σ	679	3,07	921,49	3993,35	122,88	6143,54	460,74	1843

ков, рассчитанные по данным 11 специально подобранных береговых станций, расположенных на всех четырех берегах Черного моря: Одесса, Севастополь, Феодосия, Опасное (по данным измерений), Новороссийск, Потти, Ризе, Самсун, Стамбул, Варна, Констанца (по расчету);

3) месячные суммы осадков, рассчитанные с использованием методики применения модульных коэффициентов с учетом поправок на выдувание осадков из осадкомеров.

Величины осадков, рассчитанные методами 1 и 2 расходятся на ~ 5 %, при этом данные береговых станций выше, чем над морем (рис.8).



Р и с . 8. Соотношение месячных сумм атмосферных осадков по данным береговых пунктов, вычисленных по модели *GFS* и с использованием модульных коэффициентов.

при этом данные береговых станций выше, чем над морем (рис.8). Небольшие расхождения свидетельствуют об удачном подборе станций, равномерно распределенных по основным регионам моря.

Месячные значения, рассчитанные 1 методом («над морем») иногда более чем в вдвое отличаются от месячных сумм, вычисленных методом 3, причем разницы этих сумм имеют разные знаки (рис.8). Анализ показал, что максимальные значения, полу-

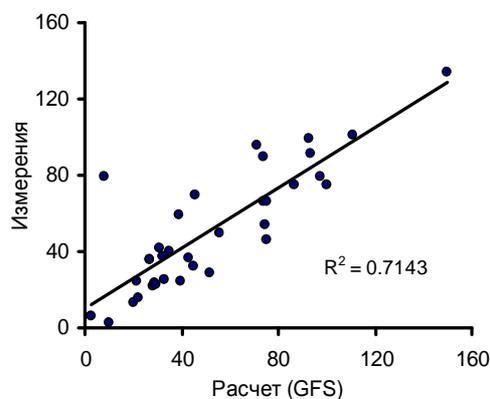
ченные с использованием модульных коэффициентов, соответствуют месяцам, в течение которых наибольшее количество осадков выпадало у северного побережья Черного моря (с ноября 2003 г. по февраль 2004 г.), а наименьшие значения – тем месяцам, когда максимум осадков отмечался у юго-восточного и южного берегов (март, апрель и май 2004 г.). Это может быть связано со следующими основными причинами:

– из пяти использовавшихся в методе три опорных станций расположены на берегах бывшего Советского Союза: Одесса, Севастополь, Феодосия, Новороссийск и Потти; три расположены на северном побережье моря, одна – на восточном (Новороссийск) и одна в юго-восточной части (Потти). Информация по южному и западному побережьям по известным причинам отсутствовала, поэтому удельный вес трех северных станций превалирует.

– положенная в основу метода 3 гипотеза о пропорциональности хода осредненных модульных коэффициентов на пяти опорных береговых станциях и в открытом море не всегда оправдана для расчетов месячных величин количества атмосферных осадков над акваторией Черного моря.

Тем не менее, разница сумм осадков за 7 месяцев мониторинга, вычисленных по каждому из трех методов (379, 416 и 452 мм соответственно), не превышает 20 %. Поэтому для вычисления годовых и среднемноголетних величин количества осадков при расчетах водного баланса метод модульных коэффициентов может быть приемлем. Однако для надежной оценки пространственного распределения количества осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, внутримесячной и внутригодовой их изменчивости предпочтительным является метод 1, основанный на оперативных данных численного моделирования (*GFS*), представленных в Интернет-сайтах, регулярно корректируемых всеми доступными натурными данными береговых наблюдений и данными комплексного анализа синоптической и спутниковой информации.

Для *качественной и количественной оценки корректности данных* модельных (*GFS*) расчетов была проведена верификация данных модели путем сравнения рассчитанных и измеренных величин в одних и тех же квадратах Черного моря (рис.1). Прежде всего, расчетные поля количества осадков (6-ти ч прогноза) сопоставлялись с данными синхронного синоптического анализа. Практически во всех анализируемых случаях данные синоптического анализа и фактическая спутниковая информация (облачность, положение фронтальных зон) показали высокую степень качественного соответствия с расчетными полями осадков по положению, конфигурации зон, площади охвата и по характеру эволюции над акваторией Черного моря. Некоторые расхождения отмечались в оценке скорости смещения зон осадков через акваторию моря, что иногда проявлялось в несовпадении сроков выпадения интенсивных осадков. Следует отметить и высокую пространственную неоднородность фактических полей осадков. Даже на рядом расположенных станциях в Одессе («Одесса», «Одесса-порт») и Севастополе («Севастополь», «Херсонесский маяк») величины осадков в течение одного и того же дождя могут отличаться на 10 – 20 мм и наступать в разные сроки. Тем не менее, сравнивались средние значения для квадрата с данными измерений в точках расположения станций: Одесса (квадрат 1), Хорлы (квадрат 3), Феодосия (квадрат 15),



Р и с . 9 . Корреляция месячных сумм атмосферных осадков (мм), определенных по данным измерений на шести береговых станциях и вычисленных (*GFS*) для 6 квадратов моря, в которых эти станции расположены.

Опасное (квадрат 16), Севастополь (квадрат 23), Ялта (квадрат 24). При этом использовался ряд данных за полугодовой цикл.

Из-за вышеизложенных причин корреляция рассчитанных и измеренных величин на масштабе суток оказалась низкой. Однако зависимость между среднемесячными значениями слоя осадков (когда несоответствие сроков не сказывается) имеет относительно высокий коэффициент корреляции ( $K = 0,71$ ; рис.9) и подтверждает достаточную надежность расчетов, которая существенно повышается при коррекции расчетных величин натурными данными береговых измерений. Сопоставление береговых данных с наблюдением береговых данных с наблюдением

на НИС «Академик» и «Проф. Водяницкий» в удаленных от берега районах моря показало, что сравнивать эпизодические, кратковременные попутные измерения количества осадков на постояннодвигающемся судне с суточными суммами, рассчитанными или измеренными на берегу, некорректно, за исключением случаев, когда судно стоит в определенной точке на протяжении суток и более.

Точность *оценки количественных характеристик биогенных веществ*, выпадавших с осадками, значительно ниже, т.к. в период предварительной фазы мониторинга существовал ряд важных ограничений:

- химический анализ проб атмосферных осадков проводился только в двух пунктах – Севастополе и Одессе, – расположенных на северном побережье Черного моря, поэтому для разных районов моря в расчетах выпадений на всю площадь моря использовались ближайшие по времени данные этих двух станций;
- отсутствовали регулярные измерения количества осадков и их химического состава в открытом море, необходимые для оценки фоновых значений концентраций химических элементов по отношению к береговым данным, а также для расчета и использования переходных коэффициентов;
- период выполненных исследований не достаточен для получения продолжительных рядов величин концентраций химических веществ в атмосферных осадках, на основании которых можно было бы получить статистически обеспеченные зависимости между количественными характеристиками осадков и значениями концентраций.

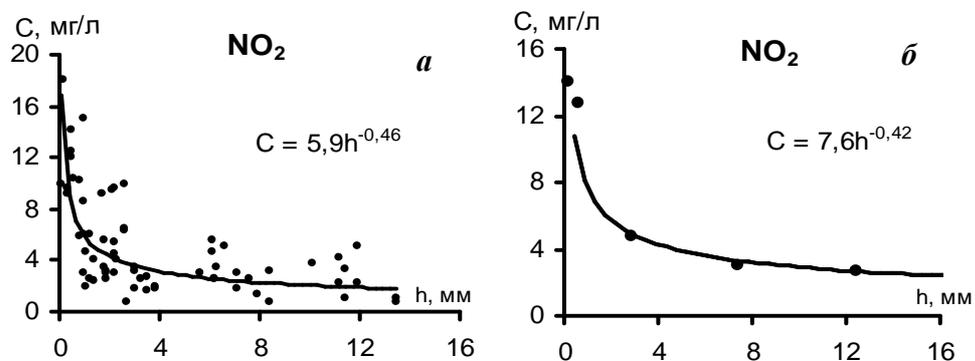
Получение таких связей для решения задачи необходимо, т.к. в формировании пространственно-временных полей приземных концентраций химических веществ в атмосферных осадках важнейшую роль играют механизмы «вымывания» и разбавления концентраций, совместное действие которых приводит к нелинейному характеру связи между концентрациями и

количеством осадков [5, 6]. Разнообразие факторов и механизмов вымывания различных химических веществ приводит к необходимости получения эмпирических зависимостей между количеством выпавших осадков и концентрациями растворенных в них веществ. Графический пример зависимости концентрации ионов нитратов в пробах атмосферных осадков от величин суточного количества осадков, полученной по результатам измерений в течение 7 месяцев, представлен на рис.10. На правом графике значения концентраций получены в результате осреднения концентраций ионов нитратов по определенным интервалам (градациям) суточных сумм осадков и хорошо аппроксимируются степенной функцией вида  $C = K \cdot h^{-a}$ , где  $h$  – суточная сумма осадков (мм),  $K$  и  $a$  – эмпирические коэффициенты;  $C$  – среднесуточная концентрация вещества в осадках (мг/л). Аналогичные зависимости определены для концентраций ионов всех исследуемых веществ. Наличие таких аналитических выражений для всех привлеченных к измерениям береговых пунктов позволило бы учесть факторы вымывания в различных районах моря и получить более точные оценки, чем по формуле (1). На основании таких зависимостей можно определить значения эмпирических коэффициентов в уравнениях связи и, используя эти коэффициенты в алгоритмах расчетной схемы, экстраполировать данные береговых пунктов на удаленные от берега районы моря, где данные о количестве осадков рассчитываются с помощью модели *GFS*.

Продолжение накопления данных на береговых станциях позволит уточнить коэффициенты и получить статистически надежные оценки среднесуточных значений концентраций ионов растворенных биогенных и других веществ в осадках и определить поступление массы веществ на поверхность всего моря по формуле:

$$M_{\text{сут}}^j = 10^{-3} \sum_{i=1}^N K_i^j h_i^{1-a_j} S_i \quad (2)$$

где  $M_{\text{сут}}^j$  – суточная масса (т) поступления  $j$ -го вещества на всю площадь поверхности Черного моря;  $K_i^j$  и  $a_j^i$  – эмпирические коэффициенты уравнения связи концентраций с суточным количеством осадков для  $j$ -го вещества в  $i$ -ом квадрате Черного моря или пункте наблюдения;  $S_i$  – площадь  $i$ -го



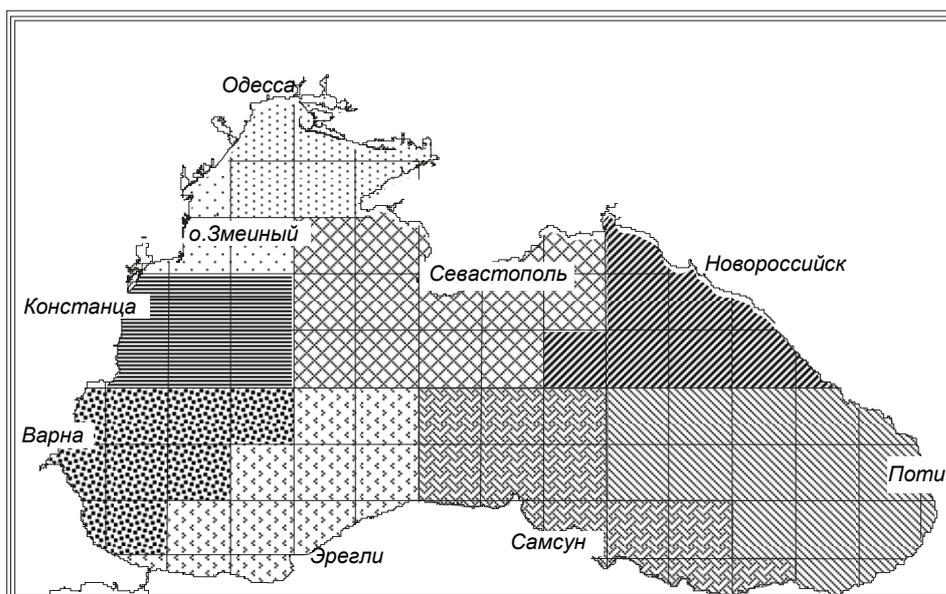
Р и с . 1 0 . Пример зависимости величин концентраций ионов нитратов от величин суточного количества осадков для г.Севастополь: фактических (а) и осредненных по градациям осадков (б).

квадрата ( $\text{км}^2$ );  $h_i$  – суточное количество осадков в  $i$ -ом квадрате Черного моря или на береговой станции (мм);  $N$  – количество условных квадратов, в которых рассчитываются среднесуточные суммы осадков.

Точность оценки поступления биогенных и других веществ во многом будет зависеть также от количества станций отбора и анализа проб атмосферных осадков, расположенных на берегах Черного моря, от продолжительности измерений, качества определений концентраций химических веществ и количества полученной информации.

Очевидно, что использование в качестве опорных только станций на побережье Украины недостаточно для расчета суммарного количества химических веществ, выпадающих с осадками на всю поверхность Черного моря. При наличии более или менее равномерной сети береговых пунктов химических наблюдений можно разделить акваторию моря на определенные зоны (сектора), прилегающие к каждому пункту, например, как это показано на рис. 11, и при расчетах количества выпадений относить данные концентраций к количеству осадков конкретной зоны (соответствующим квадратам).

Подобная система береговых пунктов измерений количества и химического состава осадков необходима еще и потому, что при прохождении южных циклонов через центральную часть Черного моря в период одного дождя в течение одних и тех же суток осадкообразующие облака могут смещаться на акваторию Черного моря, например, с северо-запада, юга и юго-востока одновременно. Химический состав поллютантов осадков этих облачных систем может существенно отличаться и должен определяться в каждом регионе акватории моря. Следовательно, система наблюдений над количеством и химическим составом атмосферных осадков обязательно должна быть международной. Только в этом случае можно обеспечить достаточную точность расчетов химических выпадений на всю акваторию Черного моря.



Р и с . 1 1 . Схема возможной системы береговых пунктов измерений количества и химического состава осадков и расчетных зон Черного моря, замкнутых на эти пункты.

**Выводы.** 1. Разработанный метод, при соблюдении вышеизложенных условий, позволяет получить достоверные оценки количества атмосферных осадков и химических веществ, поступающих с жидкими осадками на поверхность моря и может быть использован для определения роли атмосферных осадков в балансе химического загрязнения и уточнения величин пресного баланса Черного моря.

2. За период исследований собрана и обработана информация по 173 суткам с осадками, рассчитаны количественные характеристики каждого дождя, создан инструмент – программный расчетно-аналитический комплекс – для автоматизированных расчетов и представления результатов в виде суточных таблиц или карт пространственного распределения количества осадков и химических выпадений на поверхность Черного моря, а также сводных месячных таблиц и карт.

3. Полученные результаты показали, что расчеты по модульным коэффициентам могут быть завышенными или заниженными в зависимости от положения зон максимальных осадков. Для надежной оценки пространственного распределения количества осадков, выпадающих на поверхность Черного моря, внутримесячной и внутригодовой их изменчивости предпочтительным является представленный метод, основанный на оперативных данных численного моделирования (*GFS*), регулярно корректируемых всеми доступными натурными данными береговых наблюдений и данными комплексного анализа синоптической и спутниковой информации.

4. Данные мониторинга показали, что удовлетворительные величины биогенных и других растворенных в осадках веществ, выпадающих на поверхность Черного моря, можно получить только при наличии качественных (выполненных по единой методике) измерений химического состава осадков на всех берегах Черного моря (северном, восточном, южном и западном), а также в открытых районах моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репетин Л.Н., Войцехович О.В., Рябинин А.И., Ильин Ю.П., Долотов В.В., Липченко А.Е. Организация и результаты экспериментального мониторинга атмосферных осадков и биогенных веществ, выпадающих на поверхность Черного моря (проект *BSERP/GEF*) // Материалы 6-ого Междунар. Симпоз. «Экологические проблемы Черного моря».– Одесса: ОЦНТЭПИ, 2004.– С.363-367.
2. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия // СПб: Гидрометеоиздат, 1991.– 430 с.
3. *ECMWF*. The description of the ECMWF Re-analysis global atmospheric data archive. Reading.– UK, 1997.
4. Горячкин Ю.Н., Липченко М.М. О количестве атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря // Труды УкрНИГМИ.– 2000.– 248.– С.221-227.
5. Хрыневич Р. Сульфаты в атмосферных осадках Варшавы в зависимости от их количества и адвекции воздушных масс // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Междунар. симпоз. Ленинград, март 1977. Том 3.– М.: Гидрометеоиздат, 1981.– С.178-183.
6. Bleike S., Georgii N.W. Investigation on the incorporation of sulfur-dioxide into fog and rain-droplets // *Tellus*.– 1968.– 20.– P.435.

Материал поступил в редакцию 13.12.2004 г.  
После доработки 14.03.2005 г.