

Параметры атмосферных осадков в Азово-Черноморском регионе на основе модельных и натуральных данных

© 2017 Д.А. Яровая, В.Л. Посошков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: daryk777@inbox.ru, vla_po@mail.ru

Поступила 11.07.2016 г. После доработки 03.10.2016 г.

Проведена верификация результатов моделирования осадков для Азово-Черноморского региона по данным наблюдений с метеостанций Северо-Евразийского климатического центра. В качестве модельных данных использовались результаты глобального реанализа *MERRA* и региональных реанализов *PRECIS* и *RegCM*. Верификация проводилась по двум критериям: индекс согласия и вероятность обнаружения. Оценена достоверность основных параметров осадков (интенсивность и частота), проведено сравнение модельных и измеренных значений функций распределения суточного количества осадков. Показано, что во всех реанализах зимой результаты моделирования осадков лучше согласуются с данными наблюдений, чем летом. В летнее время по некоторым показателям расхождение с натурными данными в региональных реанализах меньше, чем в глобальном реанализе. Особое внимание уделено данным с метеостанции, расположенной в регионе со сложной орографией и интенсивными осадками (Сочи). Показано, что зимой в Сочи количество осадков, рассчитанное в региональных реанализах, значительно завышено, особенно в области экстремальных осадков.

Ключевые слова: реанализ осадков, осадки в Азово-Черноморском регионе, верификация реанализа, региональное моделирование, функция распределения.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-1-11-26

Введение

Численное моделирование осадков имеет огромное практическое значение и широко используется при решении таких научно-прикладных задач, как предсказание паводков, селей, наводнений. Для получения климатических полей осадков, равно как и других метеорологических характеристик, применяются глобальные модели атмосферной циркуляции с ассимиляцией данных наблюдений (с метеостанций и со спутников). Однако вследствие низкого пространственного разрешения эти модели не подходят для изучения местных, локальных климатических процессов. Региональные модели позволяют пересчитать результаты глобального моделирования в ограниченной области на более мелкую сетку с разрешением до нескольких десятков километров. При этом, к сожалению, результаты моделирования осадков не всегда становятся лучше. Например, в работах [1, 2] обнаружено, что в региональной модели *RegCM* [3] сильно завышено (по сравнению с данными наблюдений) среднемесячное количество зимних осадков в северной части Азово-Черноморского региона. В реанализе *MERRA* [4], полученном при помощи глобальной модели, таких расхождений не наблюдалось. Связано это с тем,

что схемы расчета осадков в региональных моделях, как правило, необходимо адаптировать для каждого конкретного региона. Так, в работе [2] после ряда численных экспериментов были определены значения эмпирических коэффициентов, наиболее подходящие для модели *RegCM* при воспроизведении осадков в Азово-Черноморском регионе.

Представляет интерес сравнить глобальную и региональные модели по точности воспроизведения климатических полей осадков в Азово-Черноморском регионе. В этой работе рассматриваются два региональных реанализа *PRECIS* и *RegCM* и полученный при помощи глобальной модели реанализ *MERRA* с целью выявить основные расхождения между данными реанализов и натурных наблюдений, используя различные количественные критерии, такие как индекс согласия и вероятность обнаружения.

Данное исследование является продолжением ряда работ [1, 2, 5]. В первой из них региональный реанализ *RegCM* сравнивался с глобальными реанализами *MERRA* и *ERA-Interim* [6] за 1979 – 2013 гг. [1]. Во второй работе был сделан вывод, что для рассматриваемого периода 1980 – 2013 гг. в северной части Азово-Черноморского региона суммарное среднемесячное количество осадков в модели *RegCM* (по сравнению с данными наблюдений (массивы *ECA&D*, *E-OBS*, *NCDC*) и глобальных реанализов *MERRA*, *ERA-Interim*) занижено летом и сильно завышено зимой [2]. В работе [5] для относительно небольшого периода 2000 – 2006 гг. при помощи спутниковых данных и данных измерений с метеостанций выполнена верификация результатов моделирования осадков по региональной модели *PRECIS*.

В вышеупомянутых работах верификация проводилась либо для небольшого периода [5], либо с использованием результатов глобального реанализа в качестве контрольного массива [1]. В работах [1, 2] при оценке результатов моделирования сравнивались осредненные по пространству среднемесячное количество, интенсивность и повторяемость осадков. В данном исследовании верификация проведена для более длительного периода, чем в работе [5], и в сравнении участвовали две региональные модели, а не одна, как в работах [1, 2].

Существенным преимуществом настоящего исследования является также то, что при верификации использовался небольшой временной масштаб, равный одним суткам. Известно, что если при сравнении результатов моделирования с данными наблюдений проводится осреднение на больших временных масштабах, то это маскирует несовершенство модели и сглаживает расхождение между модельными и натурными данными.

В последнее время большинство стран используют категориальную схему верификации с использованием таблиц сопряженности и расчетом определенного набора оценочных показателей, рекомендованных Всемирным метеорологическим обществом (ВМО), или собираются переходить к ней. Так, этой теме был посвящен 6-й Международный семинар ВМО по методам верификации прогнозов погоды, проходивший в Индии (Нью-Дели) 13 – 19 марта 2014 г. Поэтому в данном исследовании, помимо числового критерия «индекс согласия», использующегося в работе [5], применяется также категориальный критерий «вероятность обнаружения», который является одной из оценочных характеристик стандартизированной системы верификации, принятой ВМО [7].

Описание данных

В работе использовались следующие массивы данных:

– Массив Северо-Евразийского климатического центра (СЕКЦ) [8], содержащий данные натуральных наблюдений с 223-х метеостанций на территории СНГ. Временные ряды, относящиеся к различным метеостанциям, охватывают разные периоды, но все заканчиваются 2006 г. В дальнейшем массив СЕКЦ будет использоваться для верификации реанализов *MERRA*, *PRECIS* и *RegCM*. В приложении 1 приведены названия и географические координаты 24 метеостанций, расположенных в Азово-Черноморском регионе (39 – 50° с. ш., 25 – 45° в. д.), а также указано относительное число пропущенных дней за рассматриваемый период. Хотя доля пропущенных дней на некоторых метеостанциях достигает 50 %, массив СЕКЦ предпочтительнее, чем массив *ECA&D* [9], который использовался для верификации в нашей предыдущей работе [2]. В *ECA&D* пропущенных дней меньше, но суточное количество осадков в отдельные дни неправдоподобно велико. Из массива СЕКЦ недостоверные значения были отбракованы.

– Региональные реанализы *PRECIS* [10] с разрешением 0,22° за 1990 – 2007 гг. и *RegCM* с разрешением 25 км за 1979 – 2013 гг. В обоих региональных реанализах начальные и граничные условия при моделировании задавались из глобального реанализа *ERA-Interim*.

– Реанализ *MERRA*, который представляет собой результат глобального моделирования с ассимиляцией спутниковых данных и данных контактных наблюдений. Он имеет пространственное разрешение $\frac{1}{2} \times \frac{2}{3}^\circ$ и охватывает период с 1979 г. по настоящее время. Его разрешение (~40 × 70 км) ниже, чем в региональных реанализах, но в системе прогнозирования *MERRA* есть дополнительный фактор, улучшающий качество моделирования: ассимиляция спутниковых данных наблюдений кучевых облаков.

Для массива СЕКЦ, а также реанализов *MERRA* и *RegCM* все характеристики рассчитывались за 1980 – 2006 гг., а для реанализа *PRECIS* – за 1990 – 2006 гг.

Методы верификации и характеристики осадков

Верификация моделей проводилась с помощью различных оценочных числовых мер, рассчитанных по данным натуральных наблюдений на метеостанциях и на основе модельных данных в ближайшем узле сетки. Поскольку узлы сетки не совпадают с положением метеостанций, это приводит к определенным погрешностям при расчете оценочных критериев. Для преодоления этих трудностей используются различные методы интерполяции, однако вследствие чрезвычайно высокой пространственной изменчивости поля осадков, в особенности осадков ливневого типа, такие методы малопродуктивны. Другой способ решения данной проблемы состоит в улучшении пространственного разрешения климатических моделей. Как указывалось выше, в данной работе разрешение региональных моделей достигает 25 км, что уменьшает расхождение между координатами рассматриваемой метеостанции и ближайшим узлом сетки. Конечно, это не устраняет полностью погрешность в оценочных критериях, но в рамках существующего разрешения моделей трудно предложить иной вариант.

При верификации реанализов рассчитывались такие величины, как интенсивность (pr_{ave}) и повторяемость ($freq$) осадков. Под интенсивностью осадков понимается среднее суточное количество осадков в дождливые дни. Повторяемость определяется как отношение числа дождливых дней к общему числу дней. День считается дождливым, если суточное количество осадков pr превышает пороговую величину pr_{min} . Выбор значения pr_{min} играет большую роль при расчете повторяемости в связи с тем, что малые значения pr на метеостанциях просто не фиксируются, а в моделях воспроизводятся даже небольшие суточные количества осадков, что может существенно увеличить число дождливых дней. В работе [5] показано, что наиболее подходящее значение pr_{min} для Азово-Черноморского региона составляет 1 мм. Поэтому в дальнейшем при расчете pr_{ave} и $freq$ учитывались только те дни, когда суточное количество осадков превышало 1 мм.

Чтобы оценить, насколько успешно в реанализе прогнозируется сам факт наличия осадков, использовался критерий «вероятность обнаружения» (POD) [11], который определяется по формуле

$$POD = N_{11} / N, \quad (1)$$

где N_{11} – количество дней, когда осадки были и по данным реанализа, и по данным наблюдений; N – общее число дней за рассматриваемый период. Диапазон изменения значений POD – от 0 до 1 (в случае идеального прогноза).

Чтобы оценить качество прогноза, используется критерий «индекс согласия» (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P'_i - O'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2}, \quad (2)$$

где O_i – наблюдаемая величина; P_i – прогнозируемая величина; $P'_i = P_i - \bar{O}$, $O'_i = O_i - \bar{O}$ – отклонения от среднего значения наблюдаемой величины [12].

В нашем случае O_i – суточное количество осадков, зафиксированное в i -й день на рассматриваемой метеостанции, а P_i – данные реанализа за тот же день в ближайшем узле расчетной сетки. Необходимо подчеркнуть, что P'_i – это отклонение прогнозируемой величины именно от среднего наблюдаемого, а не от среднего прогнозируемого значения. Величина d изменяется в интервале значений $[0;1]$ (1 означает идеальный прогноз, когда $P_i = O_i$). По сути,

формула (2) представляет собой выражение $d = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}$, где σ – средняя

квадратичная погрешность, определяемая как $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P'_i - O'_i)^2$. Из последнего выражения видно, что σ^2 достигает наибольшего значения, когда

отклонения P'_i и O'_i находятся в противофазе, т. е. $P'_i = -\alpha \cdot O'_i$, где α – произвольное положительное число. В этом случае d равно 0.

Как и повторяемость, индекс согласия зависит от pr_{\min} , но эта зависимость слабая. При увеличении pr_{\min} на порядок, от 0,1 до 1 мм, осредненная по станциям повторяемость уменьшается на 30 – 80 %, а индекс согласия – только на 2 – 9 %. В дальнейшем при расчете d (а также \bar{O} , относительно которого вычислялись P_i' и O_i') учитывались только те дни, в которые значения O_i и P_i были больше pr_{\min} , равного 1 мм.

В этой работе рассматривались также функции распределения суточного количества осадков. Известно, что кумулятивную функцию распределения количества осадков с высокой степенью точности можно описать при помощи гамма-распределения:

$$F(pr) = \int_{-\infty}^{pr} \frac{(x \cdot \beta)^{\alpha-1} e^{-x\beta}}{\beta \Gamma(\alpha)} dx, \quad (3)$$

где pr – суточное количество осадков в дождливые дни; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция, равная по определению $\Gamma(\alpha) = \int e^{-t} t^{\alpha-1} dt$, α называют параметром формы, β – параметром масштаба. Для оценки параметров гамма-распределения α и β использовался метод моментов [13].

Помимо теоретической функции распределения, определяемой выражением (3), была рассчитана также статистическая функция распределения

$$F^*(pr) = N_{pr} / N, \quad (4)$$

где N_{pr} – число дней, в которые количество выпавших осадков было меньше, чем pr . Поскольку выражение (3) описывает распределение случайной величины, которая строго положительна (т. е. не может принимать значение, равное нулю), то при расчете статистической функции $F^*(pr)$ рассматривались только те дни, когда выпадали осадки. При построении функции распределения $F^*(pr)$ выбран интервал 0,1 мм (максимальное разрешение дождемера).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показана интенсивность зимних и летних осадков на разных метеостанциях. Зимой относительная погрешность при расчете pr_{ave} на отдельных метеостанциях может достигать 50 %, но в целом данные реанализов хорошо согласуются с данными наблюдений. Осредненная по всем станциям относительная погрешность составляет ~10, 15 и 20 % для реанализов *RegCM*, *PRECIS* и *MERRA* соответственно, при этом на большинстве метеостанций pr_{ave} занижена. Летом интенсивность осадков занижена почти на всех метеостанциях в среднем на 30 – 45 % и коэффициенты корреляции между pr_{ave} и относительной погрешностью составляют 0,7 – 0,8, то есть чем больше измеренная летняя интенсивность осадков, тем больше относительное занижение этой величины в реанализе.

Необходимо также отметить, что, согласно работе [2], в северной части Азово-Черноморского региона (24 – 48° в. д., 47 – 54° с. ш.) осредненная по пространству интенсивность осадков в реанализе *RegCM* завышена по сравнению с *MERRA*. Это подтверждается рис. 1: на всех метеостанциях, распо-

ложенных севернее 47° с. ш., значения pr_{ave} в реанализе *RegCM* больше, чем в *MERRA*.

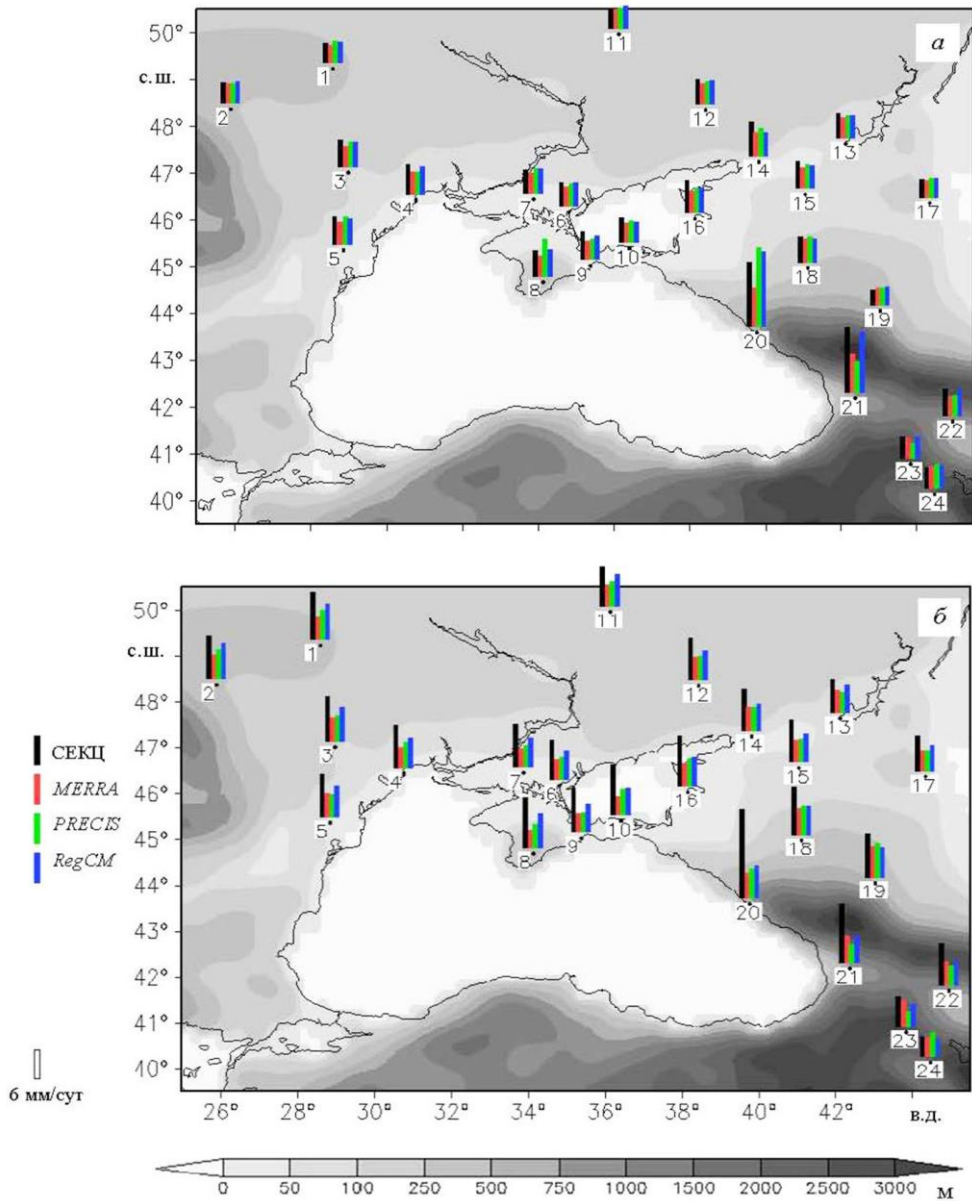


Рис. 1. Интенсивность осадков pr_{ave} , мм, зимой (а), летом (б). Оттенками серого показана высота рельефа над уровнем моря, м

Повторяемость осадков во всех реанализах завышена, особенно летом (рис. 2). Зимой лучше всего прогнозирует наличие осадков реанализ *MERRA*, а хуже всего – реанализ *RegCM*. Для летних осадков наблюдается обратная картина: лучше всего согласуется с данными наблюдений повторяемость

осадков, рассчитанная по *RegCM*, а хуже всего – повторяемость, рассчитанная по *MERRA*. Это согласуется с выводом, сделанным в работе [2]: в северной части Азово-Черноморского региона повторяемость зимних осадков в реанализе *RegCM*, по сравнению с *MERRA*, завышена, а летних – занижена. Как было указано выше, повторяемость осадков и вероятность обнаружения сильно зависят от выбора пороговой величины pr_{\min} для определения дождливых дней. Однако даже если увеличить пороговое значение pr_{\min} в 2 раза, с 1 до 2 мм, вывод о том, что повторяемость осадков в реанализах завышена, не изменится.

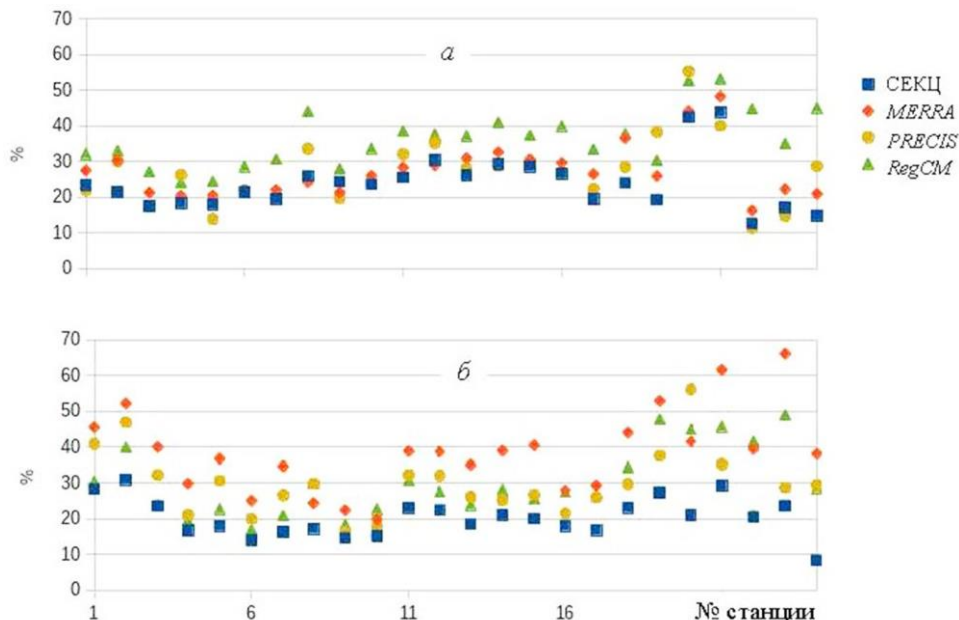


Рис. 2. Повторяемость осадков $freq$, %, на станциях зимой (а), летом (б)

Рассмотрим суммарное количество осадков, равное произведению интенсивности на повторяемость ($pr_{ave} \cdot freq$). Здесь выявлены следующие систематические расхождения между данными реанализов и наблюдений:

– В реанализе *RegCM* суммарное количество зимних осадков сильно завышено почти на всех метеостанциях, что согласуется с выводами работы [1, 2]. Согласно работе [1] переоценка $pr_{ave} \cdot freq$ связана в основном с завышением интенсивности. Но необходимо отметить, что в указанной работе для верификации регионального реанализа *RegCM* использовались данные глобального реанализа *ERA-Interim*. Если же использовать для верификации данные контактных наблюдений, как в этом исследовании, то получится, что переоценка $pr_{ave} \cdot freq$ обусловлена завышением повторяемости (рис. 2, а).

– В реанализе *PRECIS* суммарное количество летних осадков в целом занижено, что связано с недооценкой их интенсивности.

В остальных случаях осредненное по станциям суммарное количество осадков хорошо согласуется с данными наблюдений.

Главный вывод: во всех реанализах при воспроизведении летних конвективных осадков дождливых дней (когда $pr > 1$ мм) в целом больше, чем по данным измерений, а среднее суточное количество осадков, выпавших в эти дни, – меньше, т. е. воспроизведение летних осадков нуждается в улучшении.

Из рис. 3 видно, что согласно критерию «индекс согласия» во всех реанализах зимние осадки прогнозируются лучше, чем летние. Зимой осредненное по станциям значение d составляет 0,66 для реанализа *MERRA*, 0,61 для *PRECIS* и 0,47 для реанализа *RegCM*, летом – 0,47; 0,41 и 0,36 для реанализов *MERRA*, *PRECIS* и *RegCM* соответственно. Глобальный реанализ лучше прогнозирует осадки, чем региональные: на подавляющем большинстве метеостанций индекс согласия в *MERRA* больше, чем в *PRECIS* и *RegCM*. Необходимо отметить, что зимой индекс согласия в реанализе *RegCM* заметно меньше, чем в *MERRA* и *PRECIS* (рис. 3, *a*). По-видимому, этот факт объясняется тем, что, как сказано выше, в *RegCM* завышена повторяемость зимних осадков (рис. 2, *a*), вследствие чего средние значения прогнозируемой и наблюдаемой величин сильно различаются. Можно проиллюстрировать сказанное выше, представив среднюю квадратичную погрешность в виде $\sigma^2 = D_p + D_o - 2K_{po} + (\bar{P} - \bar{O})^2$, где D_p и D_o – это дисперсии P_i и O_i ; K_{po} – ковариация P_i и O_i ; \bar{P} – среднее значение прогнозируемой величины.

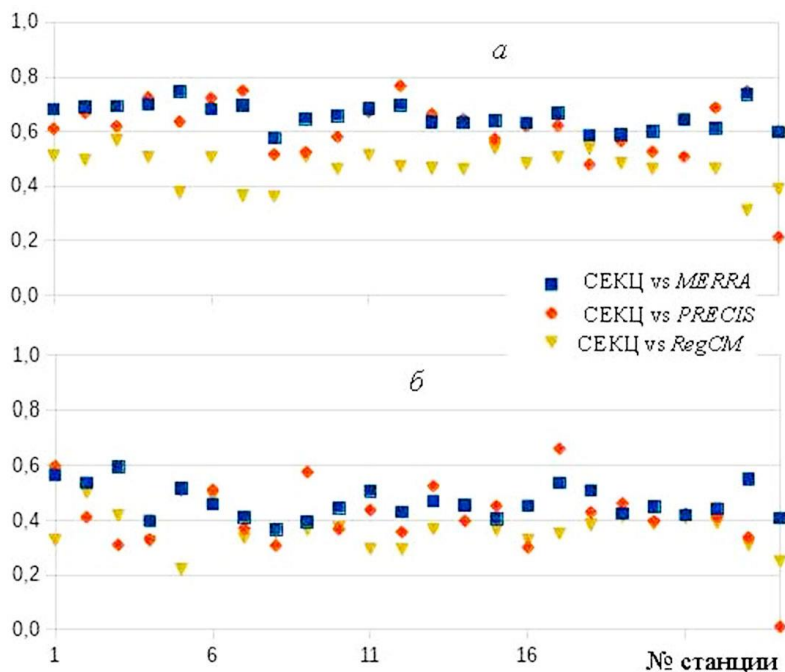


Рис. 3. Индекс согласия зимой (*a*), летом (*b*)

Рассмотрим более подробно временные ряды pr без деления на летние и зимние осадки. В табл. 1 показано осредненное по числу метеостанций среднесуточное количество осадков, выпавших в те дни, когда измеренное

значение pr находилось в указанном диапазоне. Как видно из табл. 1, суточное количество осадков во всех реанализах в среднем завышено в те дни, когда pr меньше 2,5 мм (строки 1 – 5), и занижено в те дни, когда pr больше 4 мм (строки 9, 10). Таким образом, для всех реанализов характерно сглаживание временного распределения pr : если, по данным измерений, в какой-либо день выпавшее количество осадков было меньше некоторой пороговой величины, то в реанализе в этот же день значение pr , скорее всего, будет завышено, и наоборот. Упомянутая пороговая величина лежит в диапазоне значений 2 – 2,5 мм для глобального реанализа и 3,5 – 4,5 мм для региональных реанализов. Интересно отметить, что подобное явление, но только для пространственного распределения суточного количества осадков, было обнаружено в работе [14] при верификации другой региональной модели *RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)*. Количество метеостанций, чьи данные использовались автором исследования [14], было в 5 раз больше, чем в этой работе, но он рассматривал результаты моделирования только за одни сутки, т. е. проверялась способность модели правильно прогнозировать суточное количество осадков, выпавшее в конкретный день на большой территории. Согласно его выводам, модель *RAMS* завышала суточное количество осадков на тех станциях, где осадков выпало мало, и наоборот.

Т а б л и ц а 1

Осредненное по станциям среднесуточное количество осадков в дни, когда pr , согласно данным наблюдений, находится в указанном диапазоне

№	Диапазон суточного кол-ва осадков, мм/сут	Количество осадков pr , мм/сут, по данным			
		СЕКЦ	<i>MERRA</i>	<i>PRECIS</i>	<i>RegCM</i>
1	$0 \leq pr < 0,5$	0,02	0,63	0,70	1,32
2	$0,5 \leq pr < 1$	0,67	1,80	1,93	2,70
3	$1 \leq pr < 1,5$	1,19	2,20	2,45	2,99
4	$1,5 \leq pr < 2$	1,69	2,44	2,68	3,22
5	$2 \leq pr < 2,5$	2,19	2,70	3,04	3,53
6	$2,5 \leq pr < 3$	2,70	2,64	2,92	3,43
7	$3 \leq pr < 3,5$	3,20	3,03	3,38	3,40
8	$3,5 \leq pr < 4$	3,69	3,18	3,54	3,72
9	$4 \leq pr < 4,5$	4,20	3,61	3,56	3,85
10	$4,5 \leq pr$	11,88	5,75	6,09	4,94

Из рис. 4 видно, что в региональных реанализах *PRECIS* и *RegCM* вероятность обнаружения зимних осадков выше, чем летних. В глобальном реанализе *MERRA* наоборот: зимой *POD* в целом меньше, чем летом. Причиной является, как сказано выше, то, что повторяемость летних осадков в *MERRA* сильно завышена, а чем больше дождливых дней в реанализе, тем больше

вероятность события N_{11} (см. формулу 1). Установлено, что есть линейная связь между повторяемостью осадков и вероятностью их обнаружения: коэффициенты корреляции между $freq$ и POD для всех реанализов составляют 0,7 – 0,9.

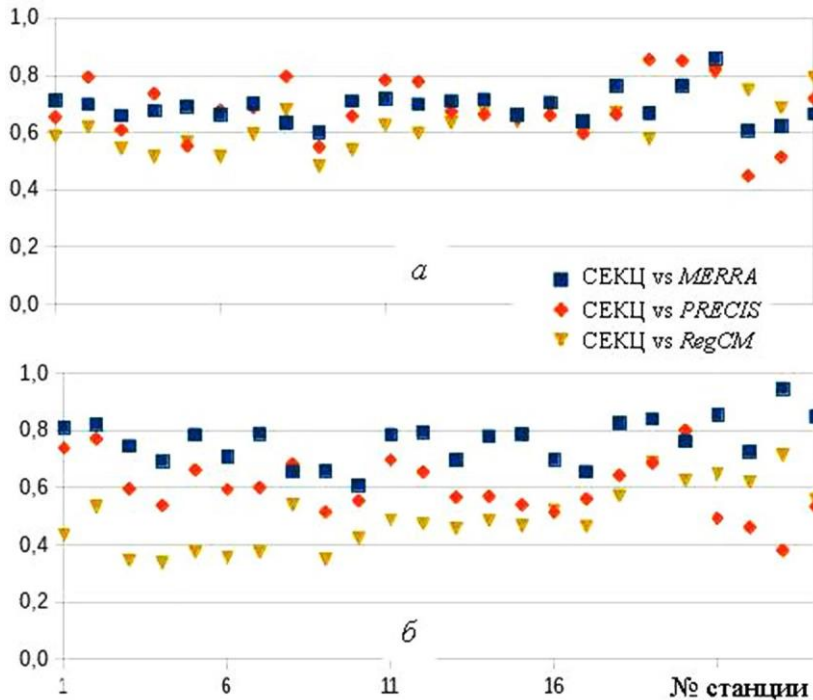


Рис. 4. Вероятность обнаружения осадков POD на станциях зимой (а), летом (б)

Рассмотрим теперь функции распределения суточного количества осадков. На рис. 5 показаны функции распределения, рассчитанные для зимнего и летнего периодов при помощи соотношения (4) и осредненные по числу метеостанций. Как видно из рисунка, зимой расхождения между измеренными и смоделированными значениями функции $F^*(pr)$ существенно меньше, чем летом. Среднеквадратичная ошибка, являющаяся количественной мерой расхождения, зимой в 2 – 3 раза меньше, чем летом. Лучше всего согласуются с данными наблюдений значения функции распределения, построенные по реанализу *RegCM*.

Одной из достаточно информативных характеристик функций распределения является 95-й перцентиль ($P95$). Расчеты показывают, что зимой почти на всех станциях модельные величины $P95$ укладываются в диапазон значений 5 – 15 мм и хорошо согласуются с данными наблюдений. Большие расхождения наблюдаются только на Кавказском побережье, на станциях № 20 и 21, расположенных в Сочи и Самтредиа. Летом для всех реанализов характерно занижение 95-го перцентиля по сравнению с данными наблюдений. Таким образом подтверждается приведенное выше заключение о том, что летние экстремальные осадки в реанализах занижены.

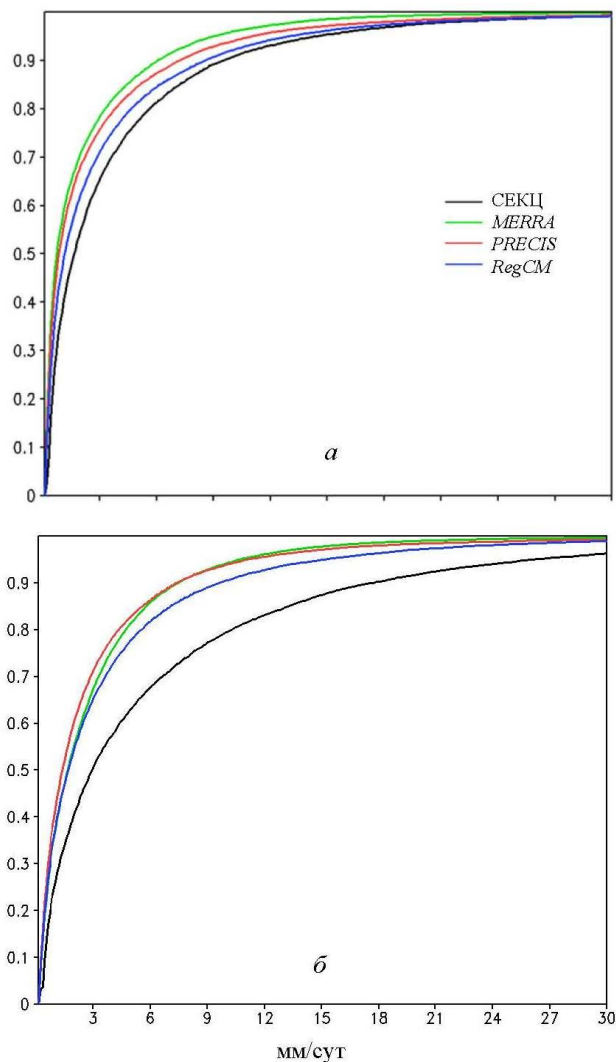


Рис. 5. Статистические функции распределения суточного количества осадков $F^*(pr)$ зимой (а), летом (б)

Ввиду особого интереса к экстремальным осадкам рассмотрим более подробно данные, относящиеся к Сочи, где, согласно данным СЕКЦ, интенсивность осадков наиболее велика: 13 мм зимой и 18 мм летом (см. рис. 1). Прежде всего, нужно отметить, что режим осадков в Сочи нетипичен для побережья средних широт. Обычно в приморских населенных пунктах наблюдается бимодальный годовой ход осадков с двумя максимумами – летним и зимним [15, 16]. Это мы можем наблюдать, например, на прибрежных станциях в Крыму (станции № 8, 9 на рис. 1). Однако в Сочи большую роль в осадкообразовании играет орография прилегающей местности, и близость горных массивов является более существенным фактором, чем близость моря. В холодное время года средиземноморские циклоны, приходящие с запада/юго-запада, встречают на своем пути Кавказский хребет, и в результате

подъема теплых и влажных воздушных масс на наветренных склонах гор выпадают осадки. Поэтому зимой суммарное количество осадков в Сочи больше, чем летом, примерно в 1,6 – 1,8 раз, т. е. годовой ход осадков имеет хорошо выраженный зимний максимум. Летом формирование облачности и осадков в основном связано с развитием сильной конвекции, поэтому летом интенсивность осадков и 95-й перцентиль больше, чем зимой. P_{95} составляет 40 и 64 мм для зимы и лета соответственно.

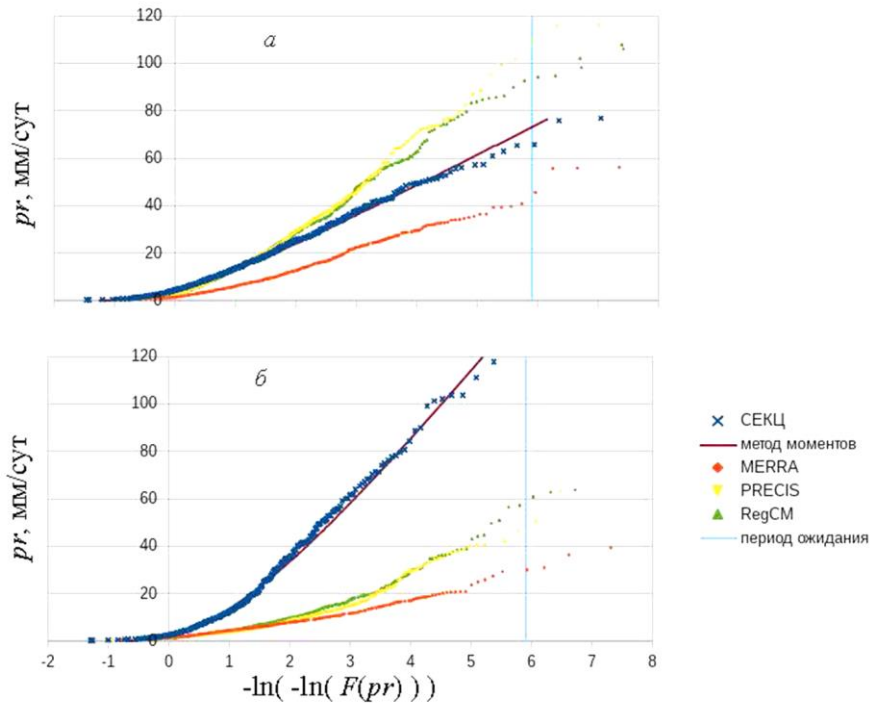


Рис. 6. Функция распределения суточного количества осадков в Сочи зимой (а), летом (б). Сплошная линия обозначает гамма-распределение

На рис. 6 сплошной кривой изображено гамма-распределение функции $F(pr)$, подогнанное к натурным данным. По горизонтальной оси отложен двойной логарифм функции распределения, по вертикальной оси – суточное количество осадков в мм. Вертикальная линия на рис. 6 обозначает ожидаемый период, равный одному году. Правее вертикальной линии на рис. 6 располагается область экстремальных осадков, т. е. дни, когда выпадают эти экстремальные величины осадков, попадаются в среднем не чаще 1 раза в год.

Согласно рис. 6 для *PRECIS* и *RegCM* характерно прогнозирование большего количества осадков по сравнению с *MERRA*, причем в области экстремальных осадков превышение может достигать 60 мм. Это в первую очередь связано с использованием в глобальном реанализе более грубого пространственного разрешения (площадь ячейки расчетной сетки в *MERRA* примерно в 4,5 раза больше, чем в *RegCM* и *PRECIS*), при котором не учитываются мелкомасштабные орографические неоднородности в прибрежной кав-

казской области. Как следствие, значения функции распределения, построенной по региональным моделям, лучше согласуются с натурными данными по сравнению с глобальной моделью (рис. 6).

Зимой в региональных реанализах количество осадков сильно завышено по сравнению с наблюдениями, причем экстремальные количества осадков в региональных реанализах на 20 – 40 мм больше, чем по данным измерений (рис. 6, а). Это можно объяснить следующим образом. Зимние осадки в районе Сочи имеют в основном орографическое происхождение: возникают вследствие того, что на пути средиземноморских циклонов оказываются Кавказские горы. В региональных моделях прибрежные горы «налезают» на море, т. е. «морским» точкам расчетной сетки вблизи побережья приписывается отличная от нуля высота над уровнем моря. Это позволяет избежать больших перепадов в высоте рельефа на границе море – суша и обеспечить численную устойчивость при моделировании. В связи с этим модельная высота местности в прибрежной области в среднем на 150 – 250 м больше, чем в действительности, что и приводит к увеличению количества прогнозируемых осадков на наветренных склонах гор при переваливании влажных воздушных масс через орографическое препятствие. В глобальном реанализе зимнее количество осадков меньше, чем по данным наблюдений, поскольку высота Кавказского хребта сильно занижена в модели.

В летнее время (рис. 6, б) как в глобальной, так и региональных моделях количество осадков занижено по сравнению с натурными данными, хотя в *RegCM* и *PRECIS* это занижение не столь значительно, как в *MERRA*. Видимо, причина этой недооценки заключается в том, что пространственное разрешение моделей недостаточно для явного воспроизведения конвекции и используемые в моделях схемы параметризации конвективных осадков нуждаются в улучшении.

Заключение

В целом зимой результаты моделирования осадков лучше согласуются с данными наблюдений, чем летом, поскольку летние осадки возникают преимущественно в результате конвекции, а горизонтальный масштаб кучевых облаков несколько меньше пространственного разрешения реанализов. Расхождения между результатами моделирования и натурными данными связаны в основном с занижением интенсивности и завышением частоты осадков. Летом наибольшее занижение интенсивности характерно для реанализа *MERRA*, а наименьшее – для реанализа *RegCM*. Повторяемость зимних осадков больше всего завышена в реанализе *RegCM*, что приводит к значительному завышению суммарного количества осадков. Летом повторяемость больше всего завышена в реанализе *MERRA*. Зимой в региональных моделях прогнозируемое распределение осадков по интенсивности хорошо согласуется с фактическим. Числовые показатели, как по индексу согласия, так и по вероятности обнаружения также достаточно высоки. В летнее время значения функции распределения осадков во всех моделях сильно занижены в сравнении с натурными данными.

Необходимо отметить, что все реанализы сглаживают временное распределение осадков: в те дни, когда выпадало меньше 2 мм, pr в моделях, как правило, завышено, а в те дни, когда выпадало больше 4 мм, – занижено.

Статистические функции распределения суточного количества осадков, построенные по региональным реанализам *RegCM* и *PRECIS*, лучше согласуются с натурными данными в сравнении с глобальным реанализом *MERRA*. Это справедливо как для функций распределения, осредненных по числу метеостанций, так и для отдельно взятой метеостанции. В качестве примера рассмотрена станция в регионе со сложной орографией и интенсивными осадками (Сочи). Обнаружено, что зимой в Сочи количество осадков в региональных реанализах сильно завышено по сравнению с данными наблюдений, особенно в области экстремальных осадков. Сделан вывод, что это завышение, возможно, связано с особенностями представления рельефа в *RegCM* и *PRECIS*. Мелкое пространственное разрешение в региональных моделях позволяет воспроизвести высокие горы, что, однако, может привести к большим градиентам высоты рельефа, если горы располагаются вблизи границы море – суша. Чтобы обеспечить численную устойчивость при моделировании, точкам расчетной сетки в предгорной области приписывается завышенная высота рельефа. В глобальных моделях прибегать к этому нет необходимости, т. к. благодаря грубому пространственному разрешению высота гор сильно сглажена.

Результаты верификации рассмотренных в статье реанализов относительно количества и самого факта выпадения атмосферных осадков дают основание надеяться, что в зимнее время модельные осадки реанализов *RegCM* и *PRECIS* могут быть использованы как альтернатива наблюдениям в районах с отсутствием метеостанций, в частности в акватории Черного и Азовского морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов А.Е., Яровая Д.А., Барабанов В.С. Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 4. – С. 14 – 28.
2. Яровая Д.А., Ефимов В.В. Численные климатические оценки осадков и температуры приповерхностного воздуха для Черноморского региона // Там же. – 2016. – № 3. – С. 63 – 76.
3. Elguindi N., Bi X., Giorgi F. et al. Regional climatic model RegCM user manual. Version 4.3. – Trieste, Italy: International Centre for Theoretical Physics, 2011. – 32 p. – URL: <https://gforge.ictp.it/gf/download/docmanfileversion/31/753/ReferenceMan.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).
4. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications // J. Clim. – 2011. – 24, No. 14. – P. 3624 – 3648.
5. Анисимов А.Е., Посошков В.Л. Оценки параметров атмосферных осадков в черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика". – Сер. Средства и информационные технологии. – 2014. – том 20. – С. 132 – 135.
6. 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, Issue 656. – P. 553 – 597. – doi: 10.1002/qj.828

7. *Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF)*. New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). – Geneva: WMO, 2002. – vol. I. – 24 p.
8. URL: <http://seakc.meteoinfo.ru/actuals/9-catalogue-stations-international-exchange/3-223-daily-series> (дата обращения: 16.02.2016)
9. URL: <http://eca.knmi.nl/> (дата обращения: 16.02.2016)
10. *Jones R.G., Noguer M., Hassell D.C. Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS*. – Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
11. *Marzban C., Stumpf G.J. A neural network for damaging wind prediction // Weath. Forecast.* – 1998. – 13, No. 1. – 151 – 163.
12. *Willmott C. Some comments on the evaluation of model performance // Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 1982. – 63, No. 11. – P. 1309 – 1313. – doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
13. *Wilks D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. – New York: Academic Press, 1995. – 464 p. – ISBN-10: 0127519653.
14. *Schultz P. An explicit cloud physics parametrization for operational numerical weather prediction // Mon. Wea. Rev.* – 1995. – 123, No. 11. – P. 3331 – 3343.
15. *Климат Украины / Под редакцией В.М. Липинского, В.А. Дячука, В.Н. Бабиченко*. – Киев: Изд-во Раевского, 2003. – 343 с.
16. *Ефимов В.В., Шакалова Е.С., Губанова Е.В. Оценка изменения экстремальных осадков Черноморского региона в XX столетии // Морской гидрофизический журнал*. – 2006. – С. 73 – 77.

Parameters of the Azov-Black Sea region precipitation based on the model and field data

D.A. Yarovaya, V.L. Pososhkov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: daryk777@inbox.ru, vla_po@mail.ru*

The results of simulating precipitation in the Azov-Black Sea region are verified using the observational data from the weather stations of the North-Eurasian Climate Centre. The results of global and regional reanalyses (MERRA, and PRECIS and RegCM, respectively) are used as the model data. Verification is done in accordance to two criteria: "consent index" and "detection probability". Reliability of the precipitation basic parameters (intensity and frequency) is assessed; the model and the measured functions of a daily rainfall distribution are compared. It is shown that in all the reanalyses the results of the winter precipitation simulation are in better agreement with the observational data than those resulted from the summer precipitation simulation. In summer time, discrepancy between certain parameters and the field data in the regional reanalyses is smaller than that in the global reanalysis. Particular attention is paid to the data obtained at the weather station located in the region of complex orography and heavy precipitation (Sochi). It is shown that the winter rainfall in Sochi derived from the regional reanalyses is significantly overstated, especially as for extreme precipitation.

Keywords: precipitation reanalysis, precipitation in the Azov-Black Sea region, reanalysis verification, regional modeling, distribution function.

Приложение. Географическое положение метеостанций и относительное число пропущенных дней

№	Город	Долгота, ° в. д.	Широта, ° с. ш.	Высота метеопло- щадки, м над ур. м.	Относительное чис- ло пропущенных зимних и летних дней за период 1980 – 2006 гг., %
1	Винница	28,60	49,23	298	6
2	Черновцы	25,90	48,37	246	7
3	Кишинев	28,98	47,02	173	37
4	Одесса	30,77	46,43	42	6
5	Измаил	28,85	45,37	30	7
6	Геническ	34,82	46,17	15	7
7	Аскания-Нова	33,88	46,45	30	7
8	Симферополь	34,13	44,68	181	6
9	Феодосия	35,38	45,03	26	7
10	Керчь	36,42	45,40	49	6
11	Харьков	36,13	49,97	155	6
12	Дебальцево	38,43	48,35	334	11
13	Цимлянск	42,12	47,63	64	0
14	Ростов-на-Дону	39,82	47,25	88	15
15	Целина	41,05	46,55	111	21
16	Приморско- Ахтарск	38,15	46,03	3	0
17	Элиста	44,33	46,37	151	0
18	Армавир	41,12	44,98	158	0
19	Пятигорск	43,03	44,05	533	38
20	Сочи	39,77	43,58	57	4
21	Самтредиа	42,37	42,18	26	52
22	Тбилиси	44,95	41,68	448	52
23	Ленинакан/Гумри	43,83	40,78	1512	56
24	Ереван	44,47	40,13	1140	55