

Мониторинг облачного покрова для решения задач региональной климатологии

Н.И. Толмачева

Улучшение предсказуемости климата – одна из главных задач исследовательской программы Всемирной метеорологической организации. Ее решение пытаются найти не только путем изучения климатообразующих процессов и разработки физико-математических моделей климатической системы атмосфера – океан – деятельный слой суши, но и с помощью статистического анализа параметров климата по данным наблюдений.

Из числа основных энергетических регуляторов климата, определяющих параметры системы атмосфера–океан–деятельный слой суши, следует выделить облачность. С одной стороны, она выступает чувствительным индикатором видимого отображения ряда физических процессов, протекающих в атмосфере, с другой стороны, как свидетельствуют данные наблюдений и результаты гидродинамического моделирования, посредством множества прямых и обратных связей существенно воздействует на эволюцию погодо- и климатообразующих процессов. Наличие облачности над любым районом земного шара сказывается в первую очередь на альбедо, суммарной радиации и эффективном излучении и в конечном итоге – на изменении радиационного баланса земной поверхности. Изменяя последний, облачность определяет тепловые условия атмосферы, через которые и влияет на эволюцию механизмов циркуляции. Интерес представляет выявление информационного содержания спутниковых данных по облачности и исследование предсказуемости климата на основе статистического моделирования временных последовательностей облачных полей.

Такое исследование актуально в связи с тем, что

– использование метеорологических искусственных спутников Земли (МСЗ) открыло новые возможности для получения надежных климатических характеристик пространственного и временного распределения облачности над большими областями земной поверхности с редкой наблюдательной метеорологической сетью, сравнимыми с размерами основных барико-циркуляционных объектов;

– по данным наземных метеорологических станций визуальные оценки количества облачности завышены и, следовательно, выводы, получаемые на основе такой информации, в определенной мере могут быть неадекватны реальной эволюции атмосферных процессов.

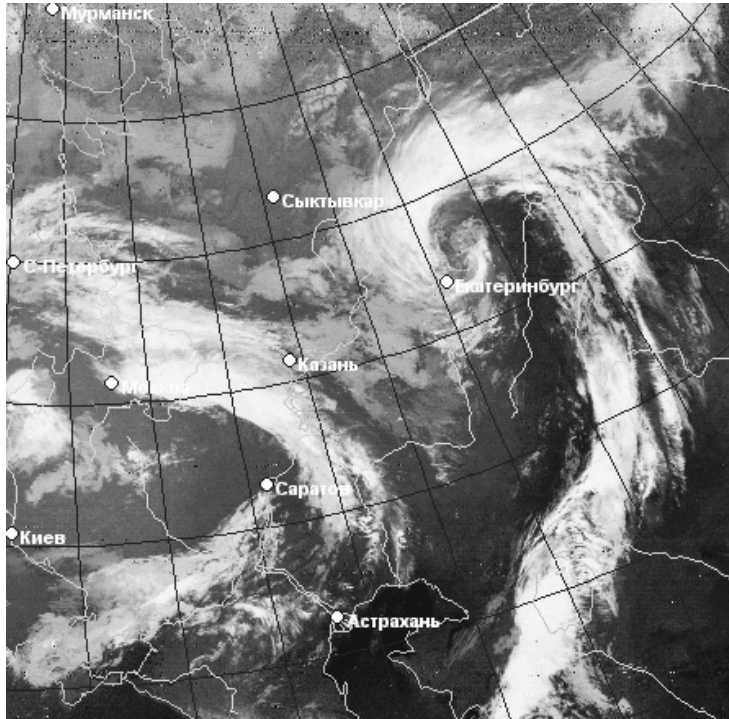
Существует немало работ, посвященных климатическому мониторингу облачного покрова, как по данным наблюдений наземных станций [1, 6], так и по спутниковым данным [2–3], но отсутствуют исследования эволюции полей облачности и осадков в различных широтных зонах и над отдельными регионами России. При наличии длинных рядов спутниковых наблюдений такие исследования могут дать ценную информацию для эмпирической диагностики трендов климата.

Спутниковые данные о параметрах облачного покрова и зонах осадков могут существенно дополнить информацию наземной наблюдательной сети (синоптические наблюдения, данные метеорологического радиолокатора).

К настоящему времени созданы и эксплуатируются различные системы обработки и классификации спутниковых изображений для обнаружения облачности и оценки ее параметров. Изображения облачности и подстилающей поверхности в види-

мом и инфракрасном диапазонах спектра (ТВ- и ИК-снимки) регулярно поступают с оперативных полярно-орбитальных («Метеор», «NOAA») и геостационарных («METEOSAT», «GOES», «GSM») метеорологических спутников. Одним из основных источников информации об облачном покрове регионального покрытия за последние 20 лет являются данные измерений МСЗ «NOAA» (рис.1а).

а)



б)

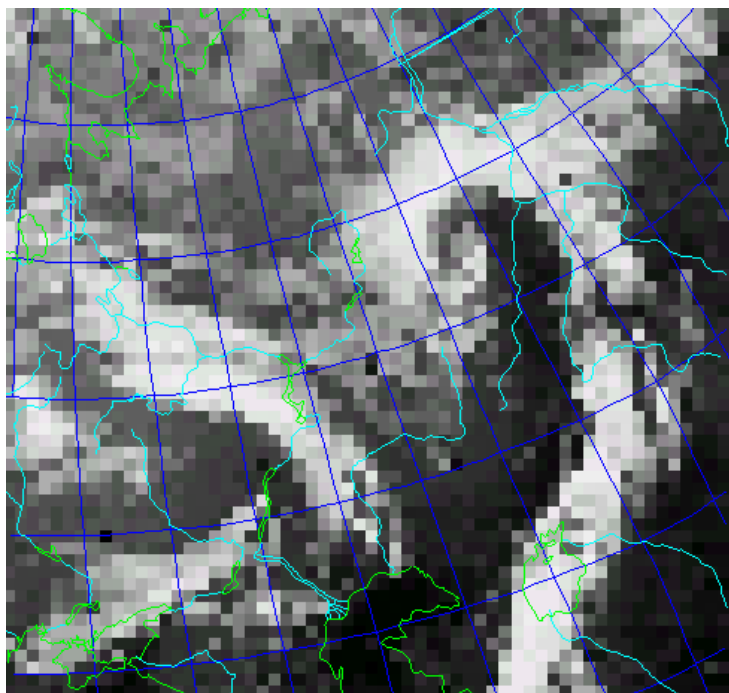


Рис. 1. Снимок облачного покрова 07.04.2000 г., 01ч. 33 мин. МСВ (а) и фрагменты (3x3 пиксела) для подсчета количества облачности и осадков (б)

В данной работе, продолжающей исследования [4–6], рассматривается метод анализа данных МСЗ для детектирования облачности и зон осадков в умеренных широтах. Основная цель — создать эффективную и не требующую больших вычислительных и информационных ресурсов систему спутникового мониторинга облачности и осадков регионального покрытия.

Исходные данные

Разработка и испытание метода оценки количества облачности и выделения зон осадков по данным измерений МСЗ «NOAA» проводились для фрагментов снимков с пространственным линейным размером около 10 км (сегменты 3×3 пикселей) с центром в точке, соответствующей положению синоптической станции и квадратам МРЛ. Таковы в среднем линейные размеры области на небосводе, для которой наземный наблюдатель определяет параметры облачного покрова [3].

Синхронный архив спутниковых, наземных и радиолокационных данных формировался для территории 45–65° с.ш., 45–65° в.д. и периода 1983–2002 гг. Разность во времени между спутниковыми и наземными измерениями не превышала 15 мин. Оценка классификации выполнялась путем сопоставления спутниковых данных с результатами синхронных наземных наблюдений за облачным покровом и осадками.

Станционные данные наблюдений за количеством общей облачности извлекались из телеграмм КН-01 и SYNOP за 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч МСВ. Значение кода (0–8) соответствует покрытию небосвода в октантах (1 октант = 12,5 %). Для удобства сопоставления облачного покрытия, определенного на метеорологических станциях и по данным спутника, значения количества облачности, рассчитанные по данным с МСЗ в процентах покрытия рассматриваемого сегмента снимка облачности, переводились в баллы и октанты.

Снимки за 1983–1997 гг. представлены атласами фотомонтажей Уральского территориального управления по гидрометеорологии и контролю природной среды (спутники «Метеор» – 8, 10, 11, «NOAA» – 6, 7, 11, 12, 14 в ТВ- и ИК-диапазонах спектра). Архив за 1998–2002 гг. создан на дисках. Снимки охватывают Европейскую территорию России, Урал и западную часть Сибири.

Данные радиолокатора представлены информацией, полученной с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка», действующего на базе МРЛ-5 (АМСГ Пермь, Екатеринбург) за 1998–2002 гг. АМРК «Метеоячейка» выводит радиолокационные изображения в виде карт облачности и явлений в радиусе 200 км с минимальным разрешением 4×4 км.

Определение количества облачности по изображениям с МСЗ

Для решения задачи определения количества облаков над выбранным участком по спутниковым снимкам требуется детальная и достаточно точная методика. До недавнего времени традиционным способом определения количества облаков были наземные наблюдения. Однако результаты этих наблюдений не всегда подходят для задач мониторинга, так как, во-первых, с помощью наземных наблюдений обозревается только 10–20 % облачного покрова Земли, во-вторых, присутствует субъективизм в оценке количества облаков и, в-третьих, результаты наземных наблюдений дают смещенные оценки закрытости земной поверхности облаками из-за искажающего влияния геометрии наблюдений.

Современный способ определения количества облаков, более подходящий для целей мониторинга, связан с развитием спутниковых наблюдений. Он позволяет получить представление о пространственном распределении облаков, которое не может

быть с достаточной полнотой получено с помощью данных наблюдений за ними на метеорологических станциях.

Количество облаков N в большинстве методик находится как отношение площади, занятой облачностью, к площади всего выбранного условного участка. В работе количество облачности определялось подсчетом облачных пикселей. Такая процедура подсчета балла облачности является наиболее простой и быстрой, что важно при оперативной обработке больших объемов спутниковой информации. Для каждого фрагмента снимка размером 3×3 пиксела (рис. 1б) проводился подсчет числа облачных пикселей и степень покрытия небосвода облачностью в процентах. Далее рассчитанные в процентах значения N переводились в баллы и октанты и сравнивались с соответствующими результатами наземных наблюдений.

Следует отметить, что первоначально поиск значений проводился для различных размеров пикселей (2×2 , 3×3 , 4×4 до 20×20). Однако последующие расчеты на выборках показали слабую зависимость значений исследуемых параметров от размера фрагмента. Вследствие этого зависимость N от размера пикселей не учитывалась.

В работе исследована также возможность определения количества облаков по спутниковым снимкам, состоящая в подсчете количества пикселей изображения, яркость которых выше определенного порога K . Для определения значения K проводилась оценка соответствия яркости пикселей изображения и наличия облачности, которая заключалась в комплексном анализе разнородной метеорологической информации. Для апробации методики использовались фрагменты спутниковых снимков (3×3 пиксела). Каждый такой фрагмент представляет собой цифровой массив градации яркости, каждый элемент которого может принимать значения от 0 (соответствует черному цвету на изображении) до 15 (соответствует белому цвету). Далее подсчитывалось число пикселей, значения которых выше определенного порога яркости.

Определение облачности предшествует второму этапу классификации — выявлению зон осадков. Выделяется облачность с осадками и без осадков. Для оценки выделения зон осадков по данным МСЗ выбирались значения кодов погоды в срок наблюдения (ww), равные 0–7 (класс «без осадков») и 50–99 (класс «осадки»).

Анализ облачности по данным спутниковых и наземных наблюдений

Для каждого заданного порогового значения K и фрагмента снимка размером 3×3 пиксела проводился подсчет числа облачных пикселей и степени покрытия небосвода облачностью (%). Далее рассчитанные пороговые значения переводились в баллы и октанты и сравнивались с соответствующими результатами наземных наблюдений. Для контроля привлекались близкие по времени (15 мин) наблюдения метеорологических радиолокаторов (Пермь, Екатеринбург). Оптимальным считалось пороговое значение, обеспечивающее точность классификации (число случаев, когда различия спутниковых и наземных оценок количества облачности не превышают 2 октантов и 3 баллов).

Поиск пороговых значений K показал, что практически все рассматриваемые пороговые значения попадают на некоторый интервал, т.е. число случаев, когда различия между оценками количества облачности по спутниковым и наземным данным не превышают 2 октантов или 3 баллов, практически одинаково. После уточнения пороговых значений и оценок точности расчета количества облачности было проделано следующее. Для каждой из 11 или 9 цифр кода (0–10 баллов, 0–8 октантов) рассчитывалось среднее количество облачности \bar{N} , среднее отклонение $\bar{d}N = (\Sigma(N_{МСЗ} - N_{МС})/N$ и среднее квадратическое отклонение (σ) спутниковых оценок количества облачности от наземных данных. Дополнительно рассчитывалось количество случаев S (в процентах

от общего числа рассматриваемых случаев), когда абсолютные ошибки $d|N| = (\Sigma(|N_{МСЗ} - N_{МС}|)/N$ составляли более одного, двух, трех и четырех баллов. Оптимальными признавались те рассчитанные по данным МСЗ значения N для всех градаций количества облачности, были достаточно близкими к наблюдаемым с поверхности земли, а значения $\bar{d}N$ и σ — минимальными.

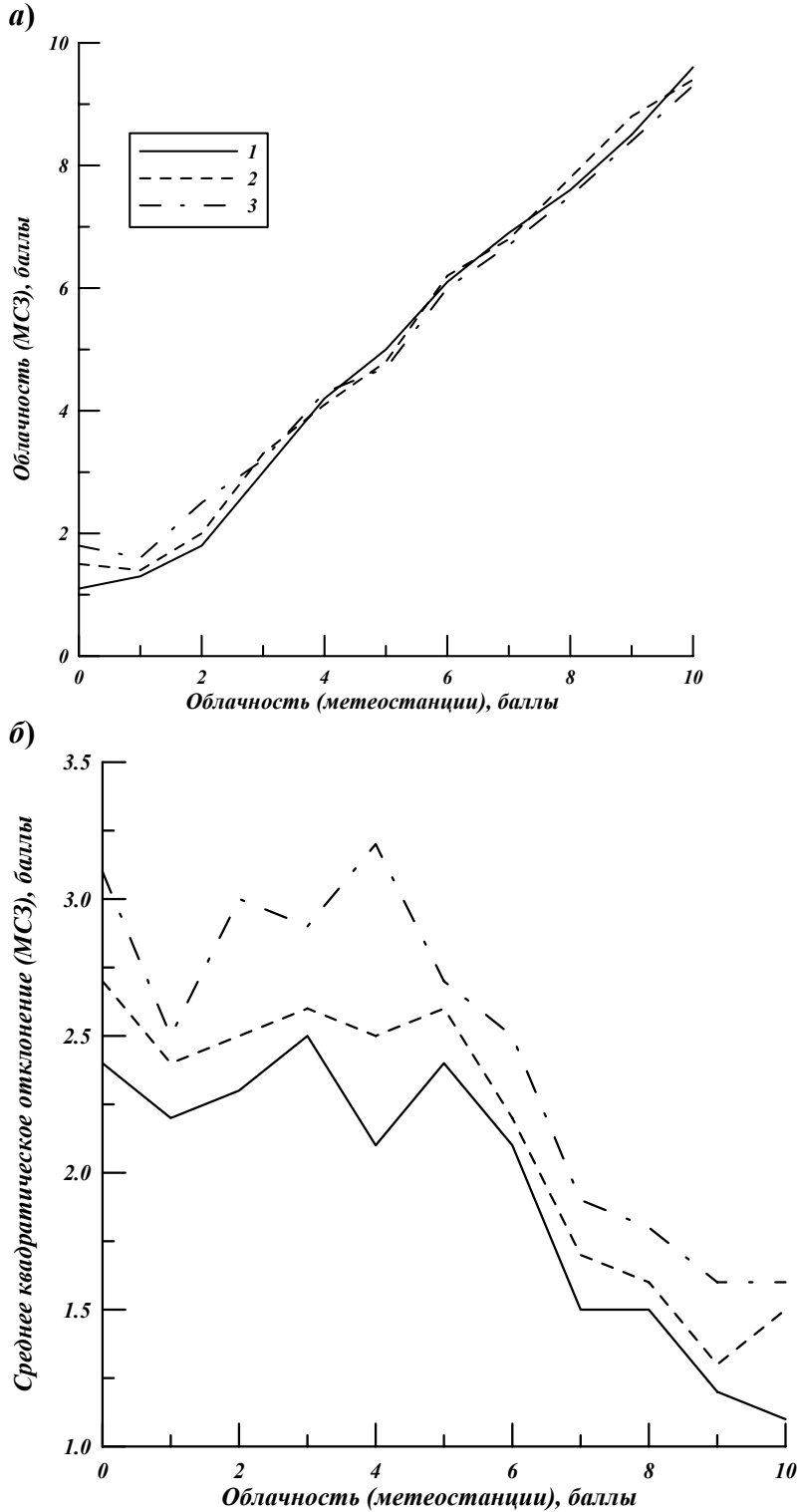


Рис. 2. Сопоставление количества облачности МСЗ с наземными данными (а) и среднее квадратическое отклонение количество облачности МСЗ от количества облачности по наземным данным (б), 1 — теплый период (IV – X месяцы), 2 — холодный период (XI – V месяцы), 3 — за 2000–2001 гг.

На рис. 2 представлены оценки количества облачности по спутниковым и наземным данным. Значения σ не превышают 1,5–2,5 баллов (рис.2б), а среднее отклонение составляет от –1 до +0,5 баллов.

Отмечено некоторое увеличение ошибок определения количества облачности для выборки 1983–1997 гг. по сравнению с выборкой за 1998–2002 гг. Это связано с увеличением интервала времени между спутниковыми и наземными измерениями, так как увеличивается вероятность смещения облачных массивов в зоне видимости метеорологической станции.

Средняя ошибка оценок количества облачности с точностью ± 1 балл составляет 30 %, с точностью ± 2 балла — 15 %. Наибольшие ошибки ($\sigma > 2$ баллов) возникают при облачности 0–5 баллов, при этом спутниковые оценки количества облачности оказываются в среднем несколько завышенными по сравнению с наземными.

Таблица 1

Точность (%) распознавания зон осадков в теплый период

Параметр	Месяцы						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Осадки	77	74	81	68	70	83	69
Без осадков	79	76	72	76	77	75	83
Ошибочно с наземными данными	23	36	25	34	32	27	33
Число случаев	563	421	745	663	498	387	460

Данные о качестве выявления зон осадков представлены в табл.1. Из таблицы видно, что вероятность определения классов «осадки» и «без осадков» примерно одинакова и составляет 70%. Зоны осадков по данным МСЗ хорошо коррелируют с контурами осадков по данным МРЛ. В пределах зон осадков можно выделять ливни, грозы, град, но количественные оценки достоверности такого детектирования проводились на малом числе случаев и только по сопоставлению с данными МРЛ.

Погрешности оценок облачности по *спутниковым данным* определяются главным образом особенностями схемы детектирования облачности. Кроме того, при наблюдениях поверхности под углами, отличными от вертикального, в поле зрения прибора могут попадать не только вершины, но и боковые стороны облаков, результатом чего является переоценка балла облачности. Не всегда эффективно детектируются единичные облачные образования или разрывы в сплошном облачном покрове, площадь которых меньше размеров поля зрения спутникового прибора. Корректное детектирование облачности также проблематично при наличии тени от облачности верхнего яруса на облака нижнего яруса. Погрешности определения облачности по *данным наземных наблюдений* обусловлены субъективностью оценок облачного покрова. Наиболее часто ошибки возникают при оценках количества кучевообразной облачности. Погрешности в этом случае могут достигать одного-двух баллов [1]. Дополнительная погрешность возникает из-за использования восьмибалльной шкалы, в соответствии с которой осуществляется кодирование данных о количестве облачности в телеграммах SYNOP.

На различие спутниковых и наземных оценок количества облачности могут оказывать влияние пространственные масштабы этих оценок. Масштаб осреднения спутниковых данных об облачности фиксирован и составляет около 10 км, в то время как область обзора небосвода наземным наблюдателем при определении количества облачности является переменной и зависит от типа облачности и высоты ее нижней границы. Следует учитывать и временной фактор, который вызывает дополнительные ошибки вследствие смещения облачного массива. Наличие многочисленных источников по-

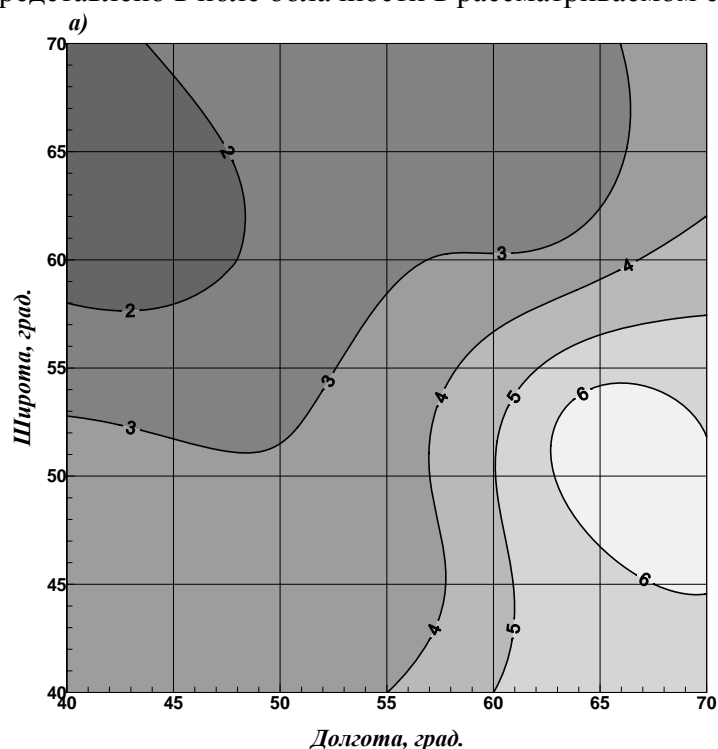
грешностей определения количества облачности в спутниковых и наземных наблюдениях делает практически невозможным достижение абсолютно точного совпадения оценок облачного покрова, полученных с их помощью. Принимая данные наземных наблюдений за истинные и учитывая все изложенное, следует считать совпадение спутниковых оценок с наземными идеальными в пределах 2 баллов и 1 октанта, а оценки с погрешностями, составляющими 3 балла и 2 октанта, – приемлемыми. Погрешности более 4 баллов и 3 октантов свидетельствуют о недостаточной эффективности используемой схемы определения облачности по спутниковым изображениям.

Структура и аномалии облачного поля

Исходные данные для построения карт облачности и ее аномалий подготовили по методике изложенной выше. Средние значения и аномалии облачности, представленные в баллах, показаны на рис.3.

Для общего представления о поле облачности по территории 40–70° с.ш., 40–70° в.д. на рис. 3а даны значения средней за 1983–2002 гг. облачности.

Заметим, что количество облачности с МСЗ на 1–1,5 балла ниже, чем по наземным наблюдениям, но нам важно показать не абсолютную величину балльности облачности, а особенности ее пространственной структуры. Зимой Центральная и Северная часть России, включая регион Черного моря, находилась в области облачности, равной или превышающей 5 баллов, а регион Урала и Западной Сибири — преимущественно в области облачности ниже 5 баллов. Интересные результаты представлены на рис.3б и в. Аномалии облачности проявляют тенденцию выстраиваться в меридиональном направлении, так что положительная аномалия облачности располагалась в зоне Северного Урала и в полосе региона Черного моря. При этом центральная и восточная часть России находилась в области отрицательной аномалии облачности. В летний период аномалии облачности над Европейской частью также выстраиваются в северо-западном направлении (рис. 4б). Положительная аномалия распространяется от южной и центральной части России на северо-восток. Отрицательная аномалия ориентирована над Сибирью также в северном направлении. Проявление особенностей циркуляции хорошо представлено в поле облачности в рассматриваемом секторе.



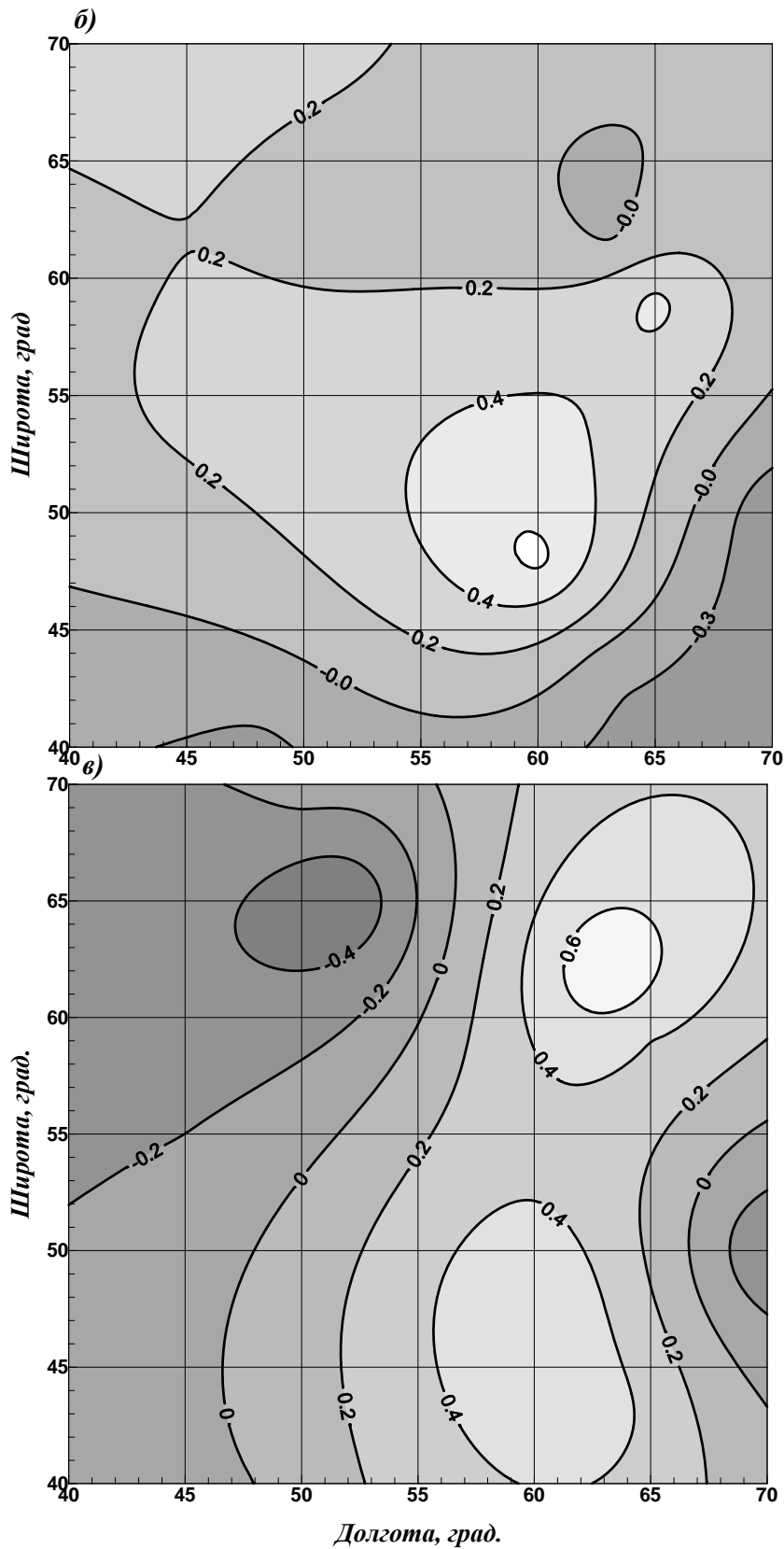


Рис. 3. Количество облачности за 1983–2002 гг. (а), аномалии облачности в теплый (б) и холодный периоды (в)

Совмещение и комплексный анализ спутниковых и наземных наблюдений облачности и осадков

Проблемы, возникающие при совместном анализе данных полученных различными приборами, можно разделить на два типа. К первому относятся проблемы пространственно-временного совмещения информации. Второй тип проблем совместного анализа данных связан с построением модели, описывающей взаимосвязь этих данных. Этапами построения этой модели может стать выделение информации о параметрах совмещенных данных, имеющих высокую пространственную корреляцию.

Качество применяемых методов совмещения данных различного пространственного разрешения, т.е. характер и величина искажений, вносимых в исходные данные при совмещении, изучено недостаточно. Сравнительному анализу некоторых методов совмещения данных посвящены работы [2, 4–6]. В них за критерий качества совмещения принята корреляция отдельных исходных и преобразованных данных. В первом случае это оправдано тождественностью исследуемых объектов, во втором – наличием известной (полученной эмпирически) аналитической связи между различными типами совмещаемых данных.

В работе опробованы четыре метода пространственного совмещения данных с приведением их к единому пространственному разрешению. Реализован алгоритм интерполяции данных на географическую сетку. С использованием описанных в [2, 4] методов выполнено совмещение данных МСЗ, метеостанций и радиолокаторов над различными районами Урала. Для проверки качества совмещения исходных данных проведен корреляционный анализ совмещенных данных. В табл.2 приведены наблюдаемые диапазоны изменения коэффициентов взаимной корреляции k для различных типов совмещенных данных.

Таблица 2

Характерные значения коэффициентов взаимной корреляции для различных типов совмещенных данных за 2000 г.

Метод измерения	Условия наблюдения	Коэффициент взаимной корреляции, k
МСЗ и метеостанции	Теплый и холодный периоды	0,85–1,0
МСЗ и МРЛ	Теплый период	0,60–0,90
МСЗ, МРЛ и метеостанции	Теплый период	0,40–0,70

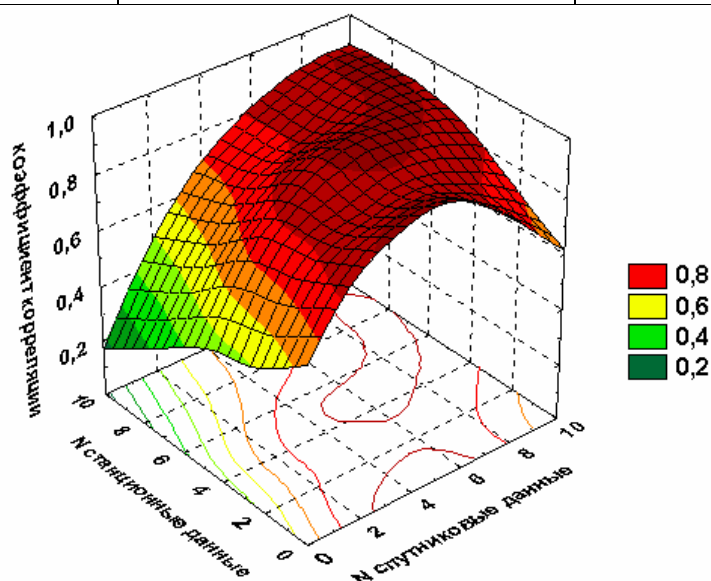
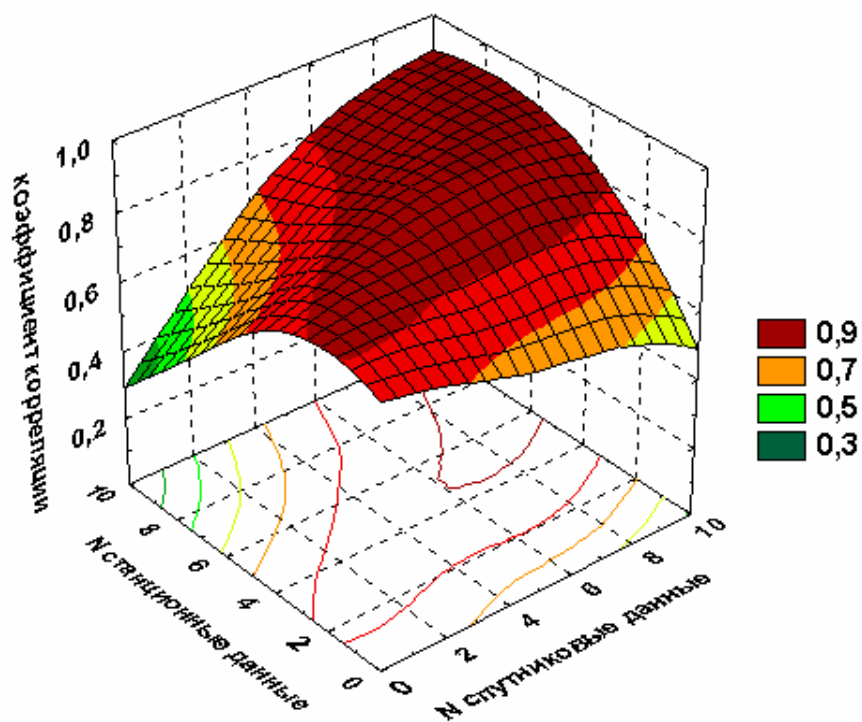


Рис. 4. Функция взаимной корреляции совмещенных данных МСЗ и метеостанций, 18 июля 2000 г.

а)



б)

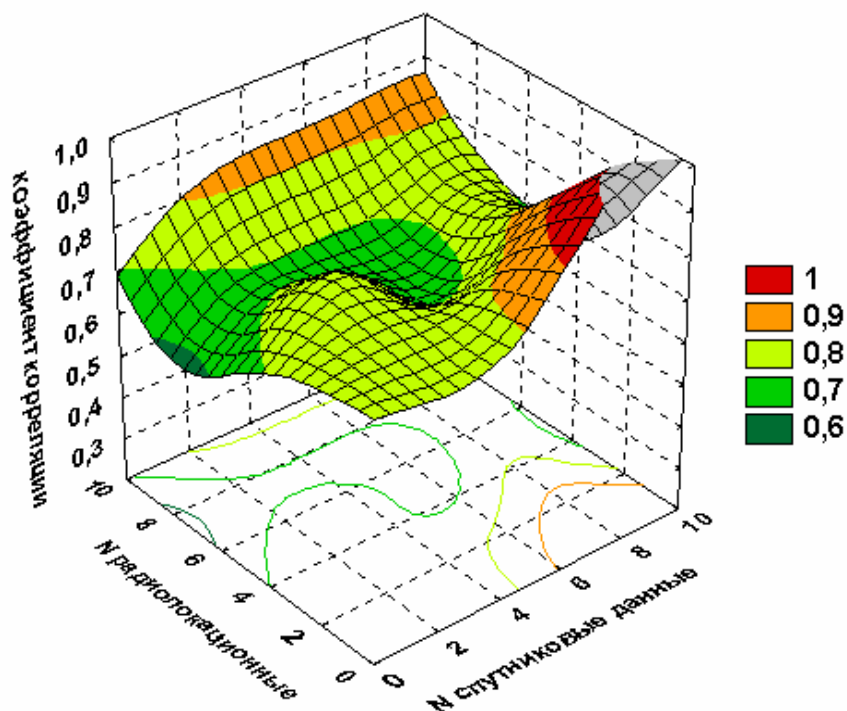


Рис. 5. Характерные графики коэффициентов корреляции совмещенных данных за теплый (а) и холодный (б) периоды.

Качество пространственного совмещения данных определялось по положению и величине максимума функции взаимной корреляции изображений. На рис. 4 показан

характерный вид функции взаимной корреляции по данным МСЗ и метеостанций. По горизонтальным осям дано взаимное совмещение в баллах облачности.

Для исследования временной изменчивости характеристик наблюдаемых объектов проводился корреляционный анализ совмещенных изображений, полученных в разное время. На рис. 5 (а, б) приводятся характерные графики коэффициентов корреляции совмещенных данных за теплый и холодный периоды. Во всех случаях коэффициент корреляции падает с уменьшением балла облачности. Относительное изменение рассчитанной величины k в зависимости от примененных методов может быть довольно значительным. Этот факт показывает важность обоснованного метода совмещения при комплексном анализе данных.

В дальнейшем на основе разработанных алгоритмов предполагается провести подробный анализ с целью выявления общих факторов, определяющих взаимную корреляцию, характерные пространственные и временные масштабы взаимной коррелированности этих данных по репрезентативным выборкам.

Выводы

В настоящей работе исследованы некоторые аспекты пространственно-временного совмещения спутниковых и наземных данных. Показана важность учета временных различий и выбора метода совмещения.

Полученные результаты свидетельствуют о значительных потенциальных возможностях использования спутниковых измерений для оценки количества облачности. Применение разработанной процедуры анализа снимков позволяет определить количество облачности с погрешностями, не превышающими 2 октанта (или 25% облачного покрытия), в 80% всех случаев сопоставления спутниковых и наземных наблюдений на Урале.

Эффективность разработанной процедуры оценки количества облачности и осадков позволяет предложить ее в дальнейшем в качестве инструмента для осуществления мониторинга облачного покрова и решения задач региональной климатологии.

Библиографический список

1. Берлянд Т.Г. Глобальное распределение общего количества облаков / Т.Г. Берлянд, А.А. Строкина. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 71 с.
2. Вельтищев Н.Ф. Анализ суточных сумм осадков с использованием метеостанций и инфракрасных измерений с геостационарных спутников / Н.Ф. Вельтищев, О.В. Жильцова // Метеорология и гидрология, 1997, № 10, С. 12–21.
3. Матвеев Ю.Л. Глобальное поле облачности / Ю.Л. Матвеев, Л.Т. Матвеева, С.А. Солдатенко. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 279 с.
4. Толмачева Н.И. Объективный анализ полей осадков по радиолокационным и станционным измерениям / Н.И. Толмачева // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 1998. С. 44–58.
5. Толмачева Н.И. Комплексный анализ турбулентности, облачности и осадков с использованием радиозондовых, станционных и радиолокационных измерений: Автореф. канд. дис. / Н.И. Толмачева. Пермь, 2000.
6. Толмачева Н.И. Характеристики зон активной конвекции по данным МРЛ и МСЗ / Н.И. Толмачева. // Проблемы географии и геологии Сибири. Научная конференция. Вестник Томск. ун-та./ Томск, 2003. С. 229–232.