

Д/М
Н 370'8

Географическое общество СССР
Академии наук СССР



АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ
М Е Т О Д Ы
В ИССЛЕДОВАНИИ
ОКРУЖАЮЩЕЙ
С Р Е Д Ы

Ленинград

1980

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СССР
АКАДЕМИИ НАУК СССР

Аэрокосмические методы в
исследовании окружающей среды

(Сборник научных трудов)

3760

ЛЕНИНГРАД
1980



Прогресс в изучении окружающей среды с целью ее освоения и рационального использования в значительной степени может быть обеспечен разработкой дистанционных методов исследования земли. В сборнике рассматриваются проблемы аэрокосмического мониторинга окружающей среды. Освещены возможности и практика использования дистанционной информации для исследования вод суши, распространения и динамики морских льдов, изучения болот, контроль за параметрами природной среды, важных для изучения климата. Обсуждены проблемы изменения окружающей среды под влиянием хозяйственной деятельности человека и вопросы разработки методов аэрокосмического контроля этих изменений. Показаны макроизменения в природной среде, происшедшие под воздействием на нее ряда крупных городов земного шара, выявленные по данным анализа материалов космических наблюдений. Обсуждены принципы системного картографирования, охраны и рационального использования природных ресурсов по космическим фотоматериалам. Проанализированы особенности генерализации разнотипных космических снимков, важные для понимания формирования космических изображений окружающей среды и извлечения из них географической информации. Намечены перспективы использования дистанционных и прежде всего космических средств наблюдений для изучения различных параметров географической оболочки, необходимые для выявления особенностей ее структуры и ее изменений, важные для создания единой глобальной системы наблюдений (спутниковой, самолетной и наземной) за планетой Земля.

Сборник может быть полезен специалистам в области дистанционной индикации природной среды, широкому кругу географов, занимающихся проблемами мониторинга изменений окружающей среды.

Ответственный редактор А. А. Григорьев

Печатается по решению президиума

Географического общества СССР

© Географическое общество СССР, 1980

В. В. КУПРИЯНОВ, В. Г. ПРОКАЧЕВА, В. Ф. УСАЧЕВ

СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

В исследованиях окружающей среды и ее основного звена — гидрологического цикла — все большее значение приобретает информация, получаемая при помощи искусственных спутников Земли (ИСЗ). Значительно расширяется круг задач, которые до настоящего времени решались на основе наземных точечных наблюдений. Особенно это относится к вопросам, связанным с оценкой антропогенного влияния на гидрологический цикл, в основе которого лежит фиксация быстро меняющихся условий формирования стока в результате мелиорации, урбанизации территории и других активных воздействий. Можно констатировать, что сейчас мы еще не имеем достаточно надежной регулярной информации для пространственной характеристики речного стока и других элементов водного баланса и что получение такой информации в перспективе возможно на основе зондирования земной поверхности с ИСЗ.

Применение спутниковой информации для исследования процессов, происходящих в атмосфере и на поверхности Земли, привело к выделению самостоятельных отраслей наук: «спутниковая метеорология», «спутниковая геодезия», «спутниковая океанография». Появился также термин «спутниковая гидрология». Огромное количество качественно новой информации, которая поступает со спутников, требует разработки новых методов ее освоения, что и определило появление перечисленных отраслей наук, в частности спутниковой гидрологии.

Нам представляется, что спутниковая гидрология состоит из следующих трех основных разделов:

1. Исследования глобального гидрологического цикла.
2. Создание региональных и глобальной информационных систем.

3. Временная и пространственная характеристика водных объектов, оценка водных ресурсов.

Применительно к задачам оперативной гидрологии выделяется две группы вопросов, в решении которых используется спутниковая информация:

— сбор и передача данных наземных гидрологических наблюдений;

— получение сведений о текущем состоянии водных объектов и территорий.

Что касается вопросов первой части, то они в настоящей работе не рассматриваются. Приводятся только разработки, касающиеся получения оперативной регулярной информации о состоянии водных объектов и водосборов, в которых использовались материалы телевизионных съемок метеорологической спутниковой системы «Метеор». Для их расшифровки помимо данных стационарной наземной сети станций применяются материалы специально проведенных подспутниковых съемок. Так, проведен подспутниковый эксперимент в бассейне р. Вятки, основной целью которого была выработка дешифровочных признаков снежного покрова в равнинном районе и выяснение возможностей использования результатов в прогнозах стока от снеготаяния. Программа эксперимента включала наземные, самолетные и спутниковые съемки, предназначенные для измерения параметров снежного покрова в период его таяния [6]. Другой длительный (1976—78 гг.) эксперимент, проведенный в районе Станового нагорья, предназначен для оценки дешифрируемости границы снежного покрова в горах. Расшифровка ледовой обстановки на больших озерах и выявление дешифровочных признаков производится на основе регулярно выполняющихся ледовых авиаразведок. В процессе подспутниковых экспериментов на оз. Ладожском и Байкале производились маршрутные аэрофотосъемки при различной ледовой обстановке.

Опыт дешифрирования телевизионных изображений на основе априорной наземной информации и материалов подспутниковых съемок позволяет выделить в настоящее время три основных гидрологических параметра, поддающихся изучению по материалам рядовых спутниковых съемок. Они показаны в обобщенном виде в таблице 1 и более детально рассмотрены ниже.

Одной из важных проблем гидрологии являются расчеты и прогнозы объемов и хода весеннего половодья на реках. Точность расчета весеннего половодья, в свою очередь, определяется полнотой и объективностью информации о динамике снежного покрова на водосборе и влагосодержании в нем. Вполне вероятно, что в ближайшей перспективе практически только по данным съемок с ИСЗ возможно полу-

Современное состояние оценки гидрологических параметров по результатам дешифрирования спутниковых телевизионных изображений

Параметр	Получение	Использование
1. Снежный покров:	Дешифрирование по снимку.	Оперативное обслуживание и расчеты.
а) граница снежного покрова;		
б) степень покрытия водосбора снегом;	Расчет $\frac{F_{сн.}}{F_{общ.}} 100\%$	Расчеты стока от снеготаяния.
в) высота снеговой линии в горах;	По гипсографической кривой.	Расчеты и прогнозы стока от снеготаяния.
г) размеры зоны интенсивного загрязнения снега вокруг промышленных центров.	Дешифрирование по снимку и определение площади.	Оценка размера зоны ускоренного схода снежного покрова.
2. Ледяной покров:	Дешифрирование снимка:	Оперативное обслуживание и расчеты.
Ледовая обстановка на больших озерах; степень покрытия акватории озера льдом; дрейф льда на больших озерах.	Измерение векторов перемещения ледяных полей по последовательным снимкам.	Определение скорости ветрового дрейфа льда.
Дислокация льда на средних озерах и водохранилищах в период очищения от льда.	Дешифрирование последовательных снимков.	Уточнение параметров ледовой обстановки в период вскрытия и очищения от льда.
Определение сроков очищения от льда малых озер.	Сравнение последовательных снимков озер в весенний период.	
3. Разливы:		
а) затопления речных пойм;	Дешифрирование снимков в зоне 0,8—1,0.	
б) сезонные изменения площади озер в аридных районах;		Оценка изменений уровня воды и выявление связей с увлажненностью территории и сезона.
в) индикационные изменения ширины и площади речных русел при прохождении паводков.	Дешифрирование последовательных снимков в период паводков.	Выяснение прогностических связей ширины русла и площади его на некотором участке с расходом воды на ниже расположенных створах.

чение необходимой информации о распределении снежного покрова с требуемым пространственным охватом, частотой и точностью.

При подготовке карт распространения снежного покрова граница его картируется на больших территориях в масштабе, определяемом их назначением. При водноресурсных исследованиях границу снежного покрова после ее дешифрирования по снимку переносят на бланк водосбора, где затем и определяют степень покрытия водосбора снегом. Для горных водосборов от степени покрытия обычно переходят к эквивалентной высоте снеговой линии через гипсографическую кривую [10]. На точность картирования границы снежного покрова по спутниковым данным влияет множество факторов и прежде всего разрешающая способность исходного материала, его качество и картографическая корректность, способ обработки, наличие помех и точность дешифрирования границы, размер и особенности изучаемого водосбора. Оценка погрешности определения границы снежного покрова сейчас производится различными эмпирическими приемами. Обычно сравниваются результаты определения степени покрытия водосбора снегом или высоты снеговой линии каким-либо традиционным способом и по спутниковым снимкам либо выполняется параллельный расчет обычными способами и с использованием спутниковой информации. Иногда оценивается различие в положении границ снежного покрова (в км), нанесенных на карту по ТВ снимку и построенных по данным наземных наблюдений. Некоторые из подобных сопоставлений приведены в табл. 2.

При выполнении подспутниковых работ в районе Станового нагорья для нескольких водосборов получены материалы синхронных аэрофото- и телевизионных съемок с ИСЗ «Метеор». По этим материалам была дешифрирована граница снежного покрова и определена степень покрытия водосбора снегом (как отношение площади заснеженной части водосбора к общей его площади, выраженное в процентах). Рассмотренные водосборы занимают обширные межгорные впадины, поэтому они состоят из равнинной части днища котловины и ее горного обрамления, поднимающегося до 2000—2500 м. Граница снежного покрова надежно опознавалась на аэрофотоснимках и телевизионных изображениях. Сопоставление результатов представлено в табл. 3. За эталон при сравнении принимались результаты определения степени покрытия водосбора снегом по материалам аэрофото-съемки. Определение степени покрытия водосбора снегом по спутниковым телевизионным снимкам относительно этого эталона производится с погрешностью около 6% (табл. 3). Хорошая сходимость результатов свидетельствует о доста-

Результаты оценок точности картирования снежного покрова
по материалам телевизионных съемок с ИСЗ «Метеор»

Способ оценки	Погрешность средняя (интервал)	Характеристика объекта	Источник
Сравнение границы снежного покрова, картированной по ТВ снимку, с нулевой изолинией высоты снега, построенной по данным наземных наблюдений	35 км	ЕТС, весна 1972 г.	Курилова Ю. В. [7]
Сравнение высоты снеговой линии в горах, определенной по ТВ снимкам и по авиаразведке.	250 км	Речные бассейны Ферганской долины	Царев Б. К. [11]
Сравнение результатов определения степени покрытия водосборов снегом по материалам аэрофотосъемки и ТВ снимкам.	6,5% (0,7—13,3)	Водосборы размером от 2500 до 9280 км в районе Станового нагорья. 9 случаев. Весна 1976—77 г.	Прокачева В. Г.
Проверочный прогноз объема весеннего половодья. Высота снеговой линии определялась по ТВ снимкам.	3,2%	Р. Катунь — с. Сростки, 5 лет (1969—73 гг.)	Вострякова Н. В. [3]
Степень покрытия водосборов снегом определялась по ТВ снимкам. Расчет гидрографа и сравнение его с фактическим.	3,0—27,0%	Четыре водосбора в бассейне р. Вятки размером от 6690 до 18900 км. Весна 1975 г.	Делеур М. С. [6]

Сравнение результатов определения степени покрытия водосборов снегом по материалам аэрофотосъемки (АФС) и телевизионных съемок (ТВ) с ИСЗ «Метеор»

Водосбор (река — пункт)	Площадь водосбора (км ²)	Дата съемки	Несинхрон- ность АФС и ТВ (в часах)	Степень покрытия снегом в %			Погреш- ность ТВ отно- сительно АФС (%)
				АФС	ТВ	Разница	
Чара — с. Чара	4150	5.06.76 г.	3	44,3	44,0	-0,3	0,7
Чара — мест. Горячий Ключ	(9280)	5.06.76 г.	3	44,2	46,2	+2,0	4,5
Чара — с. Чара	4150	20.05.77 г.	0,5	46,3	44,0	-2,3	5,0
Чара — с. Чара	4150	28.05.77 г.	2	39,5	38,6	-0,9	2,3
Чара — мест. Горячий Ключ	(9280)	28.05.77 г.	2	42,4	39,4	-3,0	7,1
Муя — д. Таксимо	9900	11.06.76 г.	3	30,0	34,0	+4,0	13,3
Муякан — (фрагмент)	3550	4.06.77 г.	3	40,8	36,9	-3,9	9,6
Муякан — гмп. Лопро	(2500)	25.05.76 г.	0,5	57,7	62,9	+5,2	9,0
Муякан — гмп. Лопро	(2500)	19.05.77 г.	4	65,5	61,1	-4,4	6,7
Гоуджекит — гмп. Гоуджекит	297	24.05.76 г.	5	94,0	96,7	+2,7	2,9
Кунерма — база Кунерма	(524)	24.05.76 г.	5	98,0	87,5	-10,5	10,1
Гоуджекит — гмп. Гоуджекит	297	4.06.77 г.	1	86,8	89,0	+2,2	2,5
Кунерма — база Кунерма	(524)	4.06.77 г.	1	75,7	68,8	-6,9	9,1

(В среднем для 13 случаев)

6,4

точной достоверности спутниковой телевизионной информации для данного района. Следует отметить недостаток материалов синхронных аэрофото- и спутниковых съемок для массовой проверки их соответствия и распространения полученной погрешности на другие районы. В частности, на сильно залесенных таежных водосборах погрешности дешифрирования границы снежного покрова будут значительно выше, а иногда на таких водосборах и совсем невозможно опознать положение границы снега по спутниковому телевизионному изображению.

Одной из целей картирования границы снежного покрова является получение необходимой информации для прогноза весеннего половодья. Традиционные модели прогноза стока включают сведения о степени покрытия водосбора снегом (для равнинных районов) или высоте снеговой линии (в горах). Эти параметры обычно получают косвенными способами по наблюдениям сети наземных станций и корректируют по данным эпизодических авиаразведок. Спутниковая информация пока проходит испытания и оценку, поэтому очень осторожно включается в традиционные модели. При выполнении подспутникового эксперимента в бассейне р. Вятки для четырех частных водосборов (размером от 6690 до 18900 км²) был выполнен расчет гидрографа половодья с учетом данных о степени покрытия водосбора снегом, полученных по наземным наблюдениям также расчетным путем (по теоретической кривой обеспеченности снегозапасов), по аэровизуальным наблюдениям и по ТВ снимкам с ИСЗ «Метеор» [6]. Сравнение расчетного максимального расхода, полученного с учетом ТВ данных, с фактическим обнаружило расхождение от 3 до 27%, по наземным наблюдениям — эта величина находилась в интервале от 0 до 25%, по расчетным — 1—27% и по аэровизуальным — 3—18%. Большие отклонения расчетных данных от наблюдаемых и широкий диапазон погрешностей свидетельствуют о сравнимости способов получения степени покрытия водосбора снегом, а также о том, что ни один из этих способов в настоящее время не обеспечивает надежных результатов.

Появление способов непосредственного определения степени покрытия водосбора снегом (по ТВ снимкам) привело исследователей к поиску прямых связей этого параметра со стоком. Так, специалистам института водных проблем АН СССР для пяти частных водосборов в бассейне Дона удалось обнаружить корреляцию между степенью покрытия водосборов снегом и стоком от снеготаяния (в процентах от максимального расхода половодья). Для каждого водосбора получилась своя кривая [8]. По-видимому, для других лет положение кривых будет иным, поскольку сток опреде-

ляется не только заснеженностью водосбора, но и запасом воды в снеге и характером погоды в период снеготаяния, т. е. фактически такие связи не являются пока еще прогнозными.

Наибольшие перспективы обещает применение спутниковой информации для оценки стока от снеготаяния на горных водосборах. Здесь положение снеговой линии в каждый момент времени является показателем равновесия основных факторов стока: максимального снегозапаса и суммы положительных температур воздуха с начала таяния. Не менее важным фактором является рельеф водосбора, но это наиболее стабильный фактор. Поэтому есть основание полагать, что распределение снежного покрова и порядок его таяния на конкретном водосборе сохраняется от года к году. В таком случае характер зависимости степени покрытия водосбора снегом от сумм положительных температур воздуха должен быть устойчивым от года к году и определяется в основном максимальными снегозапасами, накопленными за зиму в горах. Действительно, такие трехпараметрические (степень покрытия водосбора снегом — сумма положительных температур воздуха с начала таяния — показатель снегозапасов, которым служит слой стока за половодье) зависимости были выявлены еще 10 лет тому назад Т. С. Абальян [1] для частных водосборов бассейна р. Варзоб (площадь бассейна 1270 км²) по материалам шестилетних аэрофото съемок. Подобные же зависимости были подтверждены Н. В. Востряковой для бассейна р. Оби по материалам спутниковых телевизионных съемок. Зависимости имеют вид экспонент, отличающихся (для разных лет) значением коэффициента затухания, который определяется, в свою очередь, значением максимальных снегозапасов или величиной стока за половодье. Закономерная устойчивость этих зависимостей от года к году позволяет принять степень покрытия водосбора снегом в некоторый момент времени (или эквивалентную ей высоту снеговой линии) за индикатор последующего стока от снеготаяния. На основании этого Н. В. Востряковой удалось выявить прогностические зависимости среднемесячного расхода воды за июнь месяц для рек Оби, Катунь и Бии от высоты снеговой линии в конце мая, полученной за десять лет (1969—1977 гг.) по спутниковым ТВ снимкам [3]. Обнаружены также хорошие зависимости (коэффициенты корреляции 0,85—0,94) объема стока за оставшийся период половодья от размера заснеженной площади на момент выпуска прогноза.

Показателем процесса формирования стока может быть не только заснеженность водосбора на фиксированный момент времени (что использовалось в рассмотренных выше

зависимостях), но и скорость изменения этой заснеженности. Специалисты САРНИГМИ для бассейна р. Амударьи до р. Керки (площадь водосбора 309 000 км²) за 10 лет (1968—1977 гг.) определяли степень покрытия водосбора снегом, аппроксимировали хронологический ход уменьшения заснеженности за март—май линейной зависимостью и рассчитывали для каждого года скорость убывания заснеженности (V). Далее была выявлена связь этой величины со среднемесячным расходом воды (Q) за вегетационный период (июнь — август). Проверка регрессии обнаружила, что вычисленные величины расходов воды отклоняются от фактических (измеренных на замыкающем створе) в пределах допусков.

Накопление материалов съемок, удлинение рядов наблюдений и проверка подобных зависимостей для других горных регионов в будущем покажет достоверность такого подхода к оценке стока от снеготаяния в горах. Сейчас на повестке дня стоит вопрос о более тонких исследованиях, направленных на получение по спутниковым данным водно-физических характеристик снежного покрова. По материалам многозональных съемок с ИСЗ «Метеор» выясняются возможности дешифрирования фронта снеготаяния и площадей одновременного снеготаяния. Но эти попытки имеют поисковый характер, и мы не будем здесь останавливаться на них.

Особое место занимает развивающееся у нас **направление** по изучению снежного покрова как индикатора распространения городских загрязнений для выявления зон влияния урбанизации на окружающую среду. Известно, что альбедо чистого снега изменяется от 0.70 до 0.90, а при загрязнении может снижаться до 0.20—0.30. На спутниковых ТВ снимках отчетливо дешифрируются многие города на фоне снежного покрова. При этом видны не сами городские или промышленные постройки, а расплывчатые пятна, демаскирующие местонахождение города. Эти пятна охватывают непосредственно город и районы с загрязненным снегом вокруг него. Сопоставление последовательных снимков свидетельствует о том, что таяние снега в пригородных зонах существенно отклоняется от зонального процесса. В начальный момент снеготаяния города и окрестности являются центрами схода снега, и только через некоторое время (исчисляемое днями, а иногда и декадами) после этого снег сходит вне зоны влияния города.

Размеры этой зоны влияния зависят от численности населения, преобладающего вида промышленности, физико-географических особенностей района и многих других факторов. Но для каждого города существует определенная площадь, на которую регулярно оседают городские загрязне-

ния; величина этой площади относительно стабильна и опознается по ранневесенним снимкам на фоне снежного покрова. Зависимость размера зоны влияния города от численности его населения не является однозначной, а в основном определяется характером преобладающей промышленности [9].

Для получения расчетных характеристик формирования весеннего половодья в зоне урбанизации по ряду городов СССР было проведено сопоставление их площадей с размерами зон влияния. Расчеты, сделанные для восьми промышленных городов СССР показали, что размеры зоны интенсивного влияния города на таяние и сход снежного покрова в 2—5 раз превышают его площадь. Если принять во внимание, что современные города в промышленно развитых странах занимают площади до 1000 км² и даже более, то можно предположить, что зона активного влияния города на снежный покров и динамику его схода сможет превысить 5000 км².

С гидрологической точки зрения наибольший интерес представляет установление размеров зоны влияния города, сроков начала и конца таяния снега в ней, а также сдвига во времени по сравнению с зональным процессом. Для 11 городов СССР, расположенных в различных географических зонах, на основании телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор» были выполнены подобные исследования. Опережение схода снега вокруг городов составило от 6 до 48 дней. Недостаточность и отрывочность использованной информации не позволяет установить расчетные зависимости. Тем не менее полученные результаты позволяют произвести весьма важное сопоставление сроков схода снежного покрова, указывающее на существенное опережение таяния снега в пределах зоны влияния городов, что необходимо учитывать при расчетах сроков и объемов весеннего половодья.

В Государственном гидрологическом институте проводились исследования возможностей использования ТВ снимков со спутников «Метеор» для определения ледовой обстановки на озерах и водохранилищах. Результаты исследований нашли отражение в опубликованных в 1978 г. «Методических рекомендациях» [4], предназначенных для использования в оперативной практике. Выяснено, что современная информация с метеорологических ИСЗ позволяет получать важные сведения о ледовом состоянии озер. Объем информации, извлекаемой со снимков, различен для озер разной площади. Кроме того, он зависит еще и от формы объекта; для узких и извилистых озер и водохранилищ сложнее дешифрировать ледовую обстановку по снимку, чем для озер той же площади, но круглой формы [9].

Для больших озер (площадью более 5000 км²) по ТВ снимку возможно достаточно детальное прочтение ледовой обстановки. Дешифровочные признаки различных деталей ледовой обстановки определялись по сопоставлению материалов синхронных ледовых авиаразведок и ТВ съемок с ИСЗ. Такие сравнения показали сопоставимость основных контуров ледяных образований, картируемых при авиаразведке и по ТВ снимку. Возможно картирование ледовой обстановки с разграничением ледяного покрова на заснеженные и малозаснеженные участки, определение местоположения кромки припая и границы льдов, выделение участков с ледяными полями различной сплоченности.

По результатам дешифрирования ряда последовательных снимков в период образования ледяного покрова (осенью) и разрушения его весной можно определить степень покрытия акватории озера льдом и оценить изменение этого параметра в период очищения озера от льда. Сейчас становится очевидным вопрос о необходимости перехода от диагноза ледовой обстановки к ее прогнозу. Анализ поведения этой площадной характеристики (степени покрытия озера льдом) в многолетнем разрезе и выяснение ее связей с определяющими факторами, по-видимому, может обеспечить подход к прогнозированию ледовитости и характерных сроков. По телевизионным снимкам за несколько последовательных сроков, когда на них зафиксированы характерные ледяные поля, можно определить скорость их перемещения и оценить ветровой дрейф льда, а также направление и особенности трансформации кромки льда. Так, для Ладожского озера за трое суток (22—25 апреля 1974 г.) скорость ветрового дрейфа льда, определенная по ТВ снимкам, была от 0,09 до 0,19 м/с [9].

При уменьшении площади озера снижается и детальность выявления ледовой обстановки по его ТВ изображению. Для средних по размеру (1000—5000 км²) озер и водохранилищ спутниковые снимки дают дополнительную информацию о процессах вскрытия озер и последовательности очищения их отдельных частей. Здесь возможна обобщенная оценка ледового состояния озера: ледяной покров, неполный ледостав, чистая вода.

Оценка ледовой обстановки по ТВ изображениям доступна только до некоторого предела площади, ниже которого трудно опознать контур озера на снимке. При площади 500—200 км² (в зависимости от формы) озера плохо дешифрируются на летних и зимних изображениях с малыми контрастами тонов. Осенью снег обычно выпадает раньше, чем замерзают озера, поэтому последние выделяются темными пятнами на светлом фоне заснеженной территории. Но в дан-

ном случае нельзя с полной уверенностью отрицать наличие льда на озерах. Поэтому для установления даты ледостава на малых озерах необходимы учащенные многократные съемки и сопоставление с метеорологическими условиями по данным наземных станций. В весенний период контрасты также велики, так как снег с прилегающих к озеру территорий обычно сходит раньше, чем вскрываются озера. Поэтому белые пятна озер хорошо выделяются на темном фоне окружающих территорий, уже освободившихся от снега. Это обстоятельство можно использовать для определения сроков очищения от льда малых озер (площадью более 10 км²). Для этой цели нужны последовательные снимки с ИСЗ в период вскрытия и очищения озер от льда. На малых озерах обычно отсутствуют наземные водомерные посты. Поэтому анализ спутниковой информации совместно с гидрометеорологическими факторами, определяющими вскрытие и очищение этих озер от льда, может привести к выявлению ценных режимных зависимостей для различных озерных провинций.

Оперативные аспекты наблюдения и контроля разливов рек и озер и вызываемых ими затоплений предусматривают дешифрирование границ водных поверхностей по последовательным снимкам в моменты интенсификации режима с целью получения выводов прикладного характера или данных для расчета. С этой точки зрения, помимо решения задач дешифрирования границ разливов и определения площадей затопления, необходимо раскрытие форм связи этих параметров с расходами или уровнями воды. Для озер, расположенных в бессточных понижениях (в аридных районах или в горах), информативной может быть связь между объемами поступающего в озеро притока воды (количество осадков, динамика заснеженности водосбора в период снеготаяния) с площадью озера. В этом случае площадь озера, дешифрируемая по снимку, служит индикатором изменения объема воды в озере, и обеспечивает материал для воднобалансовых расчетов.

При контроле затоплений речных пойм не менее важным, чем определение фактических границ разливов при высоких уровнях воды, является обнаружение прогностических связей между площадями затоплений и определяющими факторами, например расходами или уровнями воды на расположенных выше по течению реки водпостах. По современным материалам съемок с оперативных спутниковых метеорологических систем затруднительно дешифрировать границу затопления, возможно лишь определение общего контура разливов на больших реках. Для приустьевого участка р. Енисей по материалам последовательных телевизионных съе-

мок с ИСЗ «Метеор» обнаружена зависимость площадей разливов и затоплений от величины расхода воды у расположенного в 350 км выше этого участка водпоста Игарка [9].

В том случае, если водпост находится в пределах рассматриваемого участка, связь расхода воды с площадью разлива не будет прогностической, но иногда может оказаться информативной для диагноза. Так, В. Ю. Лобко по материалам съемок за 1967—1978 гг. для небольшой (площадью водосбора 1440 км²) р. Яхсу (в Средней Азии) удалось выяснить связь расхода воды с площадью зеркала водной поверхности на участке, где этот расход измеряется (у п. Карбозтонак). Длина гидравлически репрезентативного участка, определенная по методу Калинина—Милюкова, оказалась равной 4000 м, и в середине этого участка расположен гидроствор. В паводки связь расхода с уровнем воды, по которой обычно рассчитывается сток реки, неустойчива. Поэтому оказалось, что полученная связь расхода воды с площадью водной поверхности (дешифрируемой по космическим снимкам) для этого участка дает более точные сведения по стоку, чем традиционная зависимость «уровень—расход воды».

Рассмотренные здесь приемы использования площадных индикаторов (площадь озера, площадь разлива и затопленной части поймы, площадь зеркала водной поверхности на участке русла) для воднобалансовых целей (динамика объемов, учет расхода воды, величина притока и испарения) предусматривают наличие высококачественной информации и накладывают жесткие требования к этой информации:

- необходимая и достаточно высокая разрешающая способность материалов съемок;
- надежное дешифрирование границ открытой водной поверхности по этим материалам;
- наличие достаточного количества съемок в нужные моменты режимного состояния объекта.

Принципиальные основы расчета и прогноза стока и возможные подходы к его моделированию, с привлечением дистанционной информации, сформулированы группой советских ученых под руководством Г. П. Калинина. На дистанционных данных основаны возможности прогноза половодья (от снеготаяния) по динамике схода снежного покрова на водосборе, прогноза стока по изменению площадей внерусловых затоплений, по дешифрируемым на снимках индикаторам запасов воды в речной сети [8]. Но пока принципы моделирования разрабатываются в основном по материалам наблюдений наземной сети станций. Выясняются зависимости между индикаторами, которые могут быть дешифрированы по снимку и характеристиками стока, например, оце-

нивается (по наземным данным) связь между параметрами речной сети и стоком, исходя из заданной разрешающей способности съемок. Таким образом выявлены корреляция «видимой густоты» речной сети с расходом воды для р. Дон, связь между суммарной длиной «видимой» речной сети и объемом воды в ней для р. Хопер [8]. Аналогичны разработки А. И. Давыдовой [5], которая по ширине русла на 27 створах в бассейне р. Оки рассчитала на 10 лет гидрографы в замыкающем створе, где расход воды измерялся наземным способом. Сравнение расчетных гидрографов с фактическими выявило относительные погрешности расчета в среднем 25% (от 12 до 42%). Разработки по моделированию стока пока еще далеки от оперативного применения, и более детально здесь не рассматриваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абальян Т. С. Исследование распределения и стока снежного покрова в горах по материалам аэрофотосъемки в опытном бассейне р. Варзоб (Средняя Азия). Тр. IV Всесоюзного гидрологического съезда, т. 7. Л., Гидрометеоздат, 1976, с. 364—372.
2. Вострякова Н. В., Комлев А. М. Об оценке динамики снежного покрова для прогнозов весеннего половодья в Горном Алтае по данным спутниковых наблюдений.—Тр. ГГИ, Л., 1976, вып. 237, с. 32—40.
3. Вострякова Н. В. Опыт анализа телевизионной информации метеорологических спутников для гидрологических прогнозов.—В кн.: Географические проблемы при сельскохозяйственном освоении Сибири. Новосибирск, «Наука», 1977, с. 83—86.
4. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике Гидрометслужбы. Оценка ледовой обстановки озер и водохранилищ.—Л., Гидрометеоздат, 1978, с. 42.
5. Давыдова А. И. Об использовании дистанционных наблюдений в расчетах стока.—«Водные ресурсы», 1978, № 1, с. 89—96.
6. Изучение снежного покрова по данным спутниковой информации. Тр. ГГИ, Л., 1978, вып. 243, с. 80.
7. Курилова Ю. В., Колосов П. А., Поплавская Л. К., Соколов Ю. С. Исследование динамики таяния снежного покрова по данным метеорологических спутников.—Тр. ГГИ, Л., 1976, вып. 237, с. 22—31.
8. Калинин Г. П., Курилова Ю. В., Колосов П. А. Космические методы в гидрологии.—Л., Гидрометеоздат, 1977, с. 184.
9. Куприянов В. В., Прокачева В. Г. Спутниковая информация и изучение вод суши. Л., Гидрометеоздат, 1976, с. 176.
10. Темников С. Н. Использование телевизионной информации метеорологических спутников Земли в гидрологических целях.—«Метеорология и гидрология», 1970, № 3, с. 58—64.
11. Царев Б. К. Изучение снежного покрова в горных районах.—В кн.: Материалы Международного учебного семинара ООН по применению дистанционного зондирования. Баку, изд-во ЭЛМ, 1977, с. 549—579.

А. В. БУШУЕВ

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЕЙ

3760
Условия мореплавания и народнохозяйственной деятельности (рыболовства, разведки и добычи полезных ископаемых) на Арктических, Антарктических, а в зимнее время и на замерзающих морях умеренных широт полностью определяются состоянием ледяного покрова на этих акваториях. Отсюда вытекает постоянная необходимость обеспечения многочисленных потребителей текущей (фактической) и прогностической ледовой информацией. При этом для прогнозирования предполагаемой ледовой обстановки также необходимо знание фактического состояния ледяного покрова в момент составления прогноза.

Кроме того, ледяной покров морей, который по своим физическим свойствам, как подстилающая поверхность резко отличается от морской поверхности, свободной от льда, играет существенную роль в тепловом балансе Земли, что должно учитываться во всех глобальных и региональных метеорологических прогнозах, климатических и режимных исследованиях.

Успешность решения указанных задач определяется в конечном счете качеством, регулярностью и оперативностью текущей ледовой информации, получаемой судоводителями, народнохозяйственными организациями, прогностическими органами и научными учреждениями.

Под качеством ледовой информации будем понимать полноту сведений о ледяном покрове и точность определения параметров, характеризующих его состояние.

Регулярность определяется возможным минимальным периодом между последовательными осмотрами одного и того же района при заданных технических средствах и независимостью от освещенности и метеоусловий.

Оперативность полностью зависит от времени, затрачиваемого на первичную и тематическую обработку и от си-

стемы доведения обработанной информации до потребителей.

Полная характеристика ледяного покрова включает в себя сведения свыше чем по 10 показателям, из которых основными являются:

- возрастной состав;
- сплоченность и распределение льда;
- формы (распределение льдин по горизонтальным размерам);
- динамическое состояние (дрейф, сжатия, подвижки);
- пространства чистой воды среди льда;
- заснеженность;
- загрязненность;
- разрушенность (стадии таяния);
- наличие льдов материкового происхождения и их количество.

Каждый из этих показателей в свою очередь подразделяется на градации, число которых колеблется от 12 (возрастной состав) до 3 (заснеженность, загрязненность).

Вследствие неоднородности ледяного покрова в каждой выделенной зоне обычно присутствуют льды различного возраста, ледяные поля различных размеров, торосы и грязь покрывают не всю площадь, поэтому помимо самой характеристики должна определяться также и относительная площадь, занимаемая такими льдами.

Под возрастным составом льдов понимают относительное количество льдов каждого возраста в десятых долях общей площади зоны [17]. Сумма этих характеристик должна равняться общей сплоченности плавучих льдов в этой зоне.

Таким образом, точность ледовых наблюдений характеризуется, с одной стороны, точностью определения самого показателя, например толщины льда, а с другой — точностью определения относительных площадей.

Ледовая информация должна представляться потребителям в виде графических карт различного масштаба, на которых детали ледовой обстановки отображаются принятыми условными обозначениями [5, 17], или в цифровом виде на машинных носителях, что позволяет производить дальнейший анализ и статистическую обработку численными методами с использованием ЭВМ.

Сравнительно недавно единственным способом получения данных о ледовой обстановке были визуальные наблюдения с самолетов, ледоколов и экспедиционных судов. И в настоящее время основной объем информации поступает от самолетов и вертолетов визуальной ледовой разведки. Визуальные ледовые наблюдения отличаются оперативностью, не предъявляют жестких требований к освещенности, метеоус-

ловням, высотам полета, однако обязательно предполагают высокое профессиональное мастерство наблюдателей.

При визуальных наблюдениях качественная и приближенная (глазомерная) количественная оценка распределения и состояния льда производится наблюдателем по всем характеристикам одновременно. При этом наблюдатель выполняет анализ и обобщение разнородных признаков (с отбраковкой менее достоверных), определяет границы зон, мысленно производит необходимую статистическую обработку. При этом процесс определения каждой характеристики ледяного покрова складывается из двух этапов: а) выделение льдов данного вида или имеющих данную характеристику; б) количественная оценка площади этих льдов по отношению к другим или общей просмотренной площади моря. Учитывая ограниченное время пролета каждого участка, совершенно очевидно невозможность переработки наблюдателем всего объема информации.

И действительно, в результате исследования точности визуальных авианаблюдений [6], выполненного путем сравнения результатов визуальных наблюдений с данными аэрофотосъемки, а также путем сравнения результатов наблюдений, которые выполнялись по одним и тем же маршрутам примерно в одно и то же время разными наблюдателями на разных самолетах, установлены значительные ошибки количественных оценок, а при неблагоприятных условиях и самих характеристик.

При определении основных характеристик (сплоченность, количество многолетних льдов, торосистость) помимо случайных ошибок, которые лежат в пределах от 1 до 2 баллов, наблюдается примерно такое же систематическое завышение оценки, многие характеристики (сжатия, разрушенность, заснеженность и т. д.) не имеют физически обоснованного количественного выражения.

Из-за ограниченной полосы обзора при наблюдениях с малых высот непосредственно просматривается только 10—20% обследуемой акватории, что приводит к значительным ошибкам при интерполяции и экстраполяции границ, наблюдения же большинства характеристик во избежание грубых ошибок производится в пределах ограниченных углов визирования от вертикали, что еще более сужает полосу фактических наблюдений.

Все это приводит к тому, что традиционные методы визуальных авианаблюдений уже не удовлетворяют растущие запросы науки и практики. Кроме того, полный переход авиации в ближайшие годы на скоростные высотные самолеты сделает вообще невозможным выполнение визуальных ледовых наблюдений с самолетов. Поэтому вопрос перехода от

визуальных к инструментальным ледовым наблюдениям в настоящее время чрезвычайно актуален.

Интенсивное развитие техники дистанционного зондирования, под которым понимают наблюдение объектов с дальних расстояний в целях установления их физических свойств и характеристик, позволяет уже в настоящее время использовать для изучения природной среды большой комплекс разнообразных приборов.

В результате дистанционного зондирования обычно получают двумерные изображения или карты, дающие пространственное распределение энергии и ее изменения во времени. В отдельных случаях (радиолокационный толщиномер льда, лазерный профилограф) показателем той или иной характеристики является не интенсивность излучения, а временной интервал между посылкой пучка электромагнитных волн и его возвращением к приемнику. При этом данные зондирования представляют собой не двумерные изображения, а профили толщин или отметок по следу надирной линии носителя.

Приборы дистанционного зондирования могут быть классифицированы по типу носителя (ИСЗ, самолет, вертолет), геометрическим принципам образования изображения или картины распределения энергии (кадровые, щелевые, сканирующие, надирные). Но наиболее существенным признаком является рабочий диапазон спектра электромагнитных волн.

Современные приборы дистанционного зондирования работают в интервале от 0,4 мкм до 40 см, который подразделяется на следующие диапазоны: видимый (0,4—0,8 мкм), инфракрасный (0,8 мкм — 0,1 см), СВЧ радиодиапазон (0,1—40 см).

Аэрофотосъемочные аппараты представляют собой приборы для получения на светочувствительной пленке уменьшенного изображения местности, которое образуется путем проектирования точек местности прямыми лучами, проходящими через одну общую точку.

Съемка выполняется в видимом диапазоне (0,4—0,8 мкм) с интегральной разрешающей способностью 8—10 линий на 1 мм, т. е. примерно 0,1 мм в масштабе снимка. Ширина снимаемой полосы местности в зависимости от типа аппарата лежит в пределах от 0,4 до 5 высот полета.

Кратковременность и строгий закон образования снимков, постоянство элементов внутреннего ориентирования позволяют с высокой точностью определять плановые (ортодромические) и географические координаты отобразившихся на снимках точек, расстояний между ними, площадей, превышений.

Изображение льдов на аэрофотоснимках близко к вос-

принимаемому человеческим глазом в природе, поэтому так же, как и при визуальных наблюдениях, могут определяться практически все характеристики ледяного покрова. Возможность анализа зафиксированных изображений, сопоставления с эталонами, выполнения фотометрических, линейных и площадных измерений делают аэрофотосъемку одним из наиболее информативных средств.

Вместе с тем методу аэрофотосъемки присущи и существенные недостатки:

— невозможность выполнения аэрофотосъемки при низкой облачности, недостаточной освещенности и плохой вертикальной и горизонтальной видимости не позволяет, как правило, выполнять непрерывные или строго систематические наблюдения;

— большое количество получаемых материалов и сложность их фотохимической и фотограмметрической обработки в большинстве случаев исключают возможность оперативного использования данных;

— за один вылет могут покрываться сравнительно небольшие участки (так как для достоверного дешифрирования всех характеристик льдов съемки должны выполняться в масштабе крупнее 1 : 20 000).

Поэтому в настоящее время аэрофотосъемка используется в основном не как штатное средство сбора ледовой информации, а как средство контроля и тарировки всех остальных приборов дистанционного зондирования, а также для проведения отдельных методических и режимных исследований.

Сканирующие радиометры видимого диапазона являются штатным оборудованием широко внедренных в оперативную практику метеорологических ИСЗ. Так, на регулярно работающих, начиная с 1976 г. отечественных метеорологических спутниках типа «Метеор-2», которые выводятся на орбиты со средней высотой около 900 км, наклоном к плоскости экватора $81,3^\circ$ и периодом обращения около 103 мин, установлен сканирующий радиометр видимого диапазона (0,5—0,7 мкм), снимающий полосу местности шириною около 2000 км.

Сканирование производится в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты с частотой 2 Гц. Таким образом, снимки построены в продольном направлении по законам параллельной проекции, а в поперечном — по законам равнопромежуточной проекции. Разрешающая способность снимков 3,2 км вдоль кадра и около 2 км по строке. На негативах телевизионных снимков различается 9—12 полутоновых градаций, что вполне достаточно для выявления природной неоднородности ледяного покрова (рис. 1).

Постоянная работа в режиме непосредственной передачи позволяет использовать получаемую информацию для решения оперативных задач, а одновременная работа в режиме запоминания дает возможность выполнять ледовые наблюдения в глобальном масштабе.

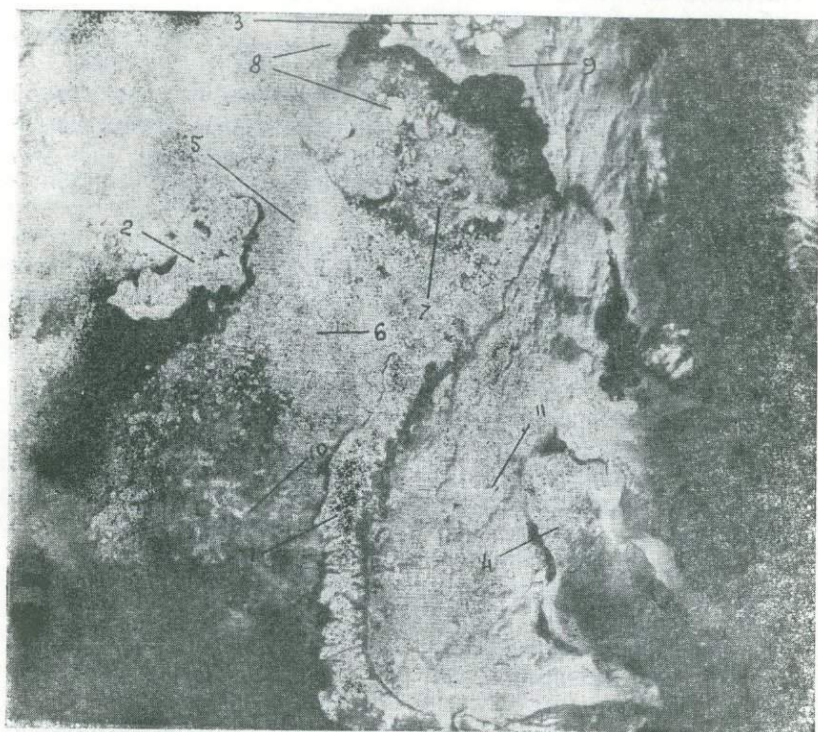


Рис. 1. Часть телевизионного снимка ИСЗ «Метеор-2» № 3, принятого на борту а/л «Сибирь» 27 июня 1978 г.: 1 — Новая Земля; 2 — ЭФИ; 3 — Северная Земля; 4 — п-ов Ямал; 5 — лед сплоченностью 10 баллов; 6 — лед сплоченностью 9 баллов; 7 — лед сплоченностью 7—8 баллов; 8 — гигантские поля; 9 — припай; 10 — просвечивающая облачность; 11 — мощная многоярусная облачность.

На основании выполненных подспутниковых экспериментов и теоретических исследований разработаны система дешифровочных признаков и методы географической привязки [12], которые позволяют определять по телевизионным снимкам:

— сплоченность в пределах основных градаций (9—10, 7—8, 4—6, а иногда и 1—3 балла);

— положение границ льдов различной сплоченности с точностью $\pm 5-6$ км;

— положение и конфигурацию крупных полей, каналов и разводий;

— положение и размеры заприпайных полыней и прогаллин;

— схему дрейфоразделов;

— вектора дрейфа льда с точностью $\pm 3-4$ км.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) разработано три метода географической привязки: аналитический, оптико-механический и графо-оптический.

Графо-оптический метод применялся при сканировании, равномерном по углу или по плоской Земле. С переходом к сканированию, равномерному по сферической Земле, он потерял свое значение.

Оптико-механический метод широко используется в оперативной практике и на судах, оборудованных пунктами приема спутниковой информации. Его преимущества — простота, оперативность и возможность составления графических карт с максимально возможной подробностью.

Большой интерес представляет аналитический метод, который пока используется только в ААНИИ при выполнении режимных исследований. Он обеспечивает меньшую детализацию и подробность, но максимально возможную точность географической привязки, позволяет определять поле векторов дрейфа. Программы, составленные для программноуправляемых электронных клавишных вычислительных машин и ЭВМ «Минск-32» (на языке ФОРТРАН-IV) предусматривают вывод результатов вычислений (координат границ и векторов дрейфа) на печать и запись на магнитную ленту. Это позволяет производить дальнейшую обработку (построение графических карт на графопостроителе, аппроксимацию векторов дрейфа на узлы регулярной сетки, вычисление поля дивергенции скоростей дрейфа) в автоматическом режиме.

Ледовая информация, полученная в результате обработки телевизионных снимков ИСЗ, позволяет решать почти в полном объеме задачи климатического мониторинга и характеризовать ледяной покров как подстилающую поверхность при разработке метеорологических прогнозов численными методами.

При использовании этой информации для научно-оперативного обеспечения морских операций, хотя некоторые характеристики (общее распределение, схемы каналов и дрейфоразделов, генеральный дрейф льдов) и определяются лучше,

чем другими средствами, общий объем сведений все же недостаточен. Не может быть определен возраст льдов старше серо-белых (формы полей меньше гигантских, торосистость и т. д.).

Однако основным недостатком телевизионной информации ИСЗ является, как и для всех приборов, регистрирующих отраженное излучение видимого диапазона, зависимость от освещенности и метеоусловий.

Телевизионная съемка может производиться только при высотах Солнца больше 5° над горизонтом. Поэтому наблюдения в Арктике возможны только с февраля по сентябрь, а в Антарктике с сентября по март. Из-за облаков, периодически закрывающих, полностью или частично, расположенные ниже льды, а в Арктике при ежедневном приеме данных за 3—5 витков, разнесенных во времени, информацию по каждому району можно получать в среднем один раз в 3—5 суток. Это не всегда удовлетворяет как моряков, так и научных работников.

Лазерные профолометры (ЛП), представляющие собой приборы для измерения расстояний от самолета до поверхности Земли (в данном случае льдов), относятся также к приборам видимого диапазона.

Так, ледовой службой министерства окружающей среды Канады используется гелий-неоновый лазерный профилометр с длиной волны 0,63 мкм, позволяющий измерять расстояния с высот 1000—1500 м с точностью 10—15 см [21, 22]. Полученные в процессе наблюдений профили записываются при помощи самописца в виде графиков и на магнитных лентах в аналоговой форме. Графические профили анализируются в процессе полета визуально с примерной оценкой количества гряд торосов и их высот в пределах различных зон. Аналоговые записи на магнитной ленте преобразуются в цифровую форму и подвергаются дальнейшему численному анализу с помощью ЦВМ. Так как высота полета самолета не остается неизменной, на истинные профили ледяного покрова накладывается низкочастотная составляющая, имеющая обычно вид неправильной синусоиды. Поэтому на первом этапе математической обработки методом фильтрации частот устраняются погрешности, обусловленные изменениями высоты полета [23], а затем производится численный анализ высот гряд торосов, их количество на единицу пути, по характеру поверхности выделяются различные льды.

Лазерные профилометры позволяют производить объективную количественную оценку торосистости при выполнении ледовых наблюдений с самолетов и вертолетов. Недостатком метода является получение данных по профилю, а не по площади, необходимость полета ниже облаков и ог-

раничение высоты полета мощностью используемого профилометра.

В участке спектра 10,5—12,5 мкм газовым поглощением радиации можно пренебречь и считать, что датчик измеряет радиацию, излучаемую подстилающей поверхностью или облачностью. Это определяет возможность использования для ледовых наблюдений установленных на спутниках сканирующих устройств, позволяющих получать картину двумерного распределения собственного излучения в указанном диапазоне.

ИК радиометры отечественных и зарубежных ИСЗ имели низкую разрешающую способность (15 км в надире на ИСЗ «Метеор», 7,4 км в надире и 15х22 км на краю снимка на ИСЗ («НОАА»). Так как объем и точность получаемой информации о параметрах ледяного покрова в значительной мере определяются разрешающей способностью снимков, применение этих датчиков для ледовых наблюдений было ограниченным.

Возможности спутниковых наблюдений за льдами существенно возросли после запуска США спутника «ТАЙРОС», оснащенного ТВ и ИК радиометрами, имеющими одинаковое разрешение порядка 3—4 км по всему полю снимка. Снимки передаются в режиме непосредственной передачи на частоте 137,62 мГц и могут приниматься отечественными пунктами приема информации.

При высоте спутника 860 км снимается полоса местности шириной около 3000 км. Закон сканирования — равномерное по сферичной Земле, масштаб изображения по строке при регистрации его на стандартный фототелеграфный аппарат примерно 1 : 31600000, или, при приеме только одного ТВ или ИК изображения 1 : 15 800 000 (рис. 2).

Фиксируемая ИК радиометром температура зависит от температуры и коэффициента излучения поверхности. Льды и морская вода имеют примерно одинаковый коэффициент излучения (0,85—0,98) [16]. Так как в период таяния льда окружающая вода имеет также температуру около 0°С, контраст между ними наблюдается только при отрицательных температурах воздуха.

По уравнению теплового баланса, температура поверхности льда является функцией температуры воздуха, тепла, излучаемого океаном, толщины снега и льда.

При отрицательных температурах воздуха температура поверхности начальных видов льдов (сало, шуга, снежура) и ниласовых льдов близка к температуре морской воды (—1,8°С). По мере увеличения толщины льдин, температура их поверхности понижается, приближаясь уже при толщине 100—120 см к температуре воздуха. Чем ниже темпера-

чем другими средствами, общий объем сведений все же недостаточен. Не может быть определен возраст льдов старше серо-белых (формы полей меньше гигантских, торосистость и т. д.).

Однако основным недостатком телевизионной информации ИСЗ является, как и для всех приборов, регистрирующих отраженное излучение видимого диапазона, зависимость от освещенности и метеоусловий.

Телевизионная съемка может производиться только при высотах Солнца больше 5° над горизонтом. Поэтому наблюдения в Арктике возможны только с февраля по сентябрь, а в Антарктике с сентября по март. Из-за облаков, периодически закрывающих, полностью или частично, расположенные ниже льды, а в Арктике при ежедневном приеме данных за 3—5 витков, разнесенных во времени, информацию по каждому району можно получать в среднем один раз в 3—5 суток. Это не всегда удовлетворяет как моряков, так и научных работников.

Лазерные профолометры (ЛП), представляющие собой приборы для измерения расстояний от самолета до поверхности Земли (в данном случае льдов), относятся также к приборам видимого диапазона.

Так, ледовой службой министерства окружающей среды Канады используется гелий-неоновый лазерный профилометр с длиной волны 0,63 мкм, позволяющий измерять расстояния с высот 1000—1500 м с точностью 10—15 см [21, 22]. Полученные в процессе наблюдений профили записываются при помощи самописца в виде графиков и на магнитных лентах в аналоговой форме. Графические профили анализируются в процессе полета визуально с примерной оценкой количества гряд торосов и их высот в пределах различных зон. Аналоговые записи на магнитной ленте преобразуются в цифровую форму и подвергаются дальнейшему численному анализу с помощью ЦВМ. Так как высота полета самолета не остается неизменной, на истинные профили ледяного покрова накладывается низкочастотная составляющая, имеющая обычный вид неправильной синусоиды. Поэтому на первом этапе математической обработки методом фильтрации частот устраняются погрешности, обусловленные изменениями высоты полета [23], а затем производится численный анализ высот гряд торосов, их количество на единицу пути, по характеру поверхности выделяются различные льды.

Лазерные профилометры позволяют производить объективную количественную оценку торосистости при выполнении ледовых наблюдений с самолетов и вертолетов. Недостатком метода является получение данных по профилю, а не по площади, необходимость полета ниже облаков и ог-

раничение высоты полета мощностью используемого профилометра.

В участке спектра 10,5—12,5 мкм газовым поглощением радиации можно пренебречь и считать, что датчик измеряет радиацию, излучаемую подстилающей поверхностью или облачностью. Это определяет возможность использования для ледовых наблюдений установленных на спутниках сканирующих устройств, позволяющих получать картину двумерного распределения собственного излучения в указанном диапазоне.

ИК радиометры отечественных и зарубежных ИСЗ имеют низкую разрешающую способность (15 км в надире на ИСЗ «Метеор», 7,4 км в надире и 15x22 км на краю снимка на ИСЗ («НОАА»). Так как объем и точность получаемой информации о параметрах ледяного покрова в значительной мере определяются разрешающей способностью снимков, применение этих датчиков для ледовых наблюдений было ограниченным.

Возможности спутниковых наблюдений за льдами существенно возросли после запуска США спутника «ТАИРОС», оснащенного ТВ и ИК радиометрами, имеющими одинаковое разрешение порядка 3—4 км по всему полю снимка. Снимки передаются в режиме непосредственной передачи на частоте 137,62 мГц и могут приниматься отечественными пунктами приема информации.

При высоте спутника 860 км снимается полоса местности шириною около 3000 км. Закон сканирования — равномерное по сферической Земле, масштаб изображения по строке при регистрации его на стандартный фототелеграфный аппарат примерно 1 : 31600000, или, при приеме только одного ТВ или ИК изображения 1 : 15 800 000 (рис. 2).

Фиксируемая ИК радиометром температура зависит от температуры и коэффициента излучения поверхности. Льды и морская вода имеют примерно одинаковый коэффициент излучения (0,85—0,98) [16]. Так как в период таяния льда окружающая вода имеет также температуру около 0°С, контраст между ними наблюдается только при отрицательных температурах воздуха.

По уравнению теплового баланса, температура поверхности льда является функцией температуры воздуха, тепла, излучаемого океаном, толщины снега и льда.

При отрицательных температурах воздуха температура поверхности начальных видов льдов (сало, шуга, снежура) и ниласовых льдов близка к температуре морской воды (—1,8°С). По мере увеличения толщины льдин, температура их поверхности понижается, приближаясь уже при толщине 100—120 см к температуре воздуха. Чем ниже темпера-

тура воздуха, тем больше температурный контраст между льдами различного возраста. Таким образом, по ИК снимкам можно выделять зоны льдов различного возраста в пределах толщин от 0 до 100—120 см.



Рис. 2. Часть ИК снимка ИСЗ «Тайрос» 18 декабря 1978 г.: 1 — ЭФИ; 2 — о. Новая Земля; 3 — п-ов Ямал; 4 — однолетний лед средний; 5 — зона однолетнего тонкого и серо-белого льда; 6 — чистая вода; 7 — облачность.

Однако прямой переход от амплитуды сигнала к толщине льда практически невозможен, так как даже если считать температуры воздуха и океана известными, уже в основных факторах имеется два неизвестных — толщина льда и толщина снега. При этом, как известно, изменение толщины снега на единицу равносильно изменению толщины льда на 7—10 единиц [11]. Но, кроме того, измеренная температура поверхности льда зависит еще от скорости ветра, влажности воздуха, солнечной радиации, характеристик прибора и его погрешностей. Поэтому можно говорить только о выделении зон различных толщин, без определения их абсолютных значений.

Кроме границ льдов различного возраста, по ИК снимкам могут определяться заприпайные полыньи, крупные каналы и разводья, положение и конфигурация гигантских полей, вероятно, дрейф льдов в динамических районах (Баренцево и Гренландское моря), т. е. довольно большой объем информации. Из-за меньших, по сравнению с полученными в видимом диапазоне ТВ снимкам, общих контрастов ИК изображений, возможность наблюдений дрейфоразделов сомнительна.

Сочетание телевизионных съемок летом и ИК съемок зимой делает спутниковые ледовые наблюдения круглогодичными. Однако основной недостаток, свойственный съемкам в видимом диапазоне — зависимость от облачности — характерен и для съемок в ИК диапазоне.

Полная независимость от метеоусловий появляется только при переходе к съемкам в радиодиапазоне.

Приборы дистанционного зондирования, работающие в микроволновой части электромагнитного спектра, делятся на пассивные и активные. Пассивные СВЧ-датчики регистрируют естественное излучение объектов в этом диапазоне, а активные датчики совмещают функции облучения и приема отраженных сигналов.

Микроволновые (СВЧ) радиометры являются устройствами регистрации радиотеплового излучения, которое характеризуется радиояркостной температурой $T_{я}$, земных образований в диапазоне длин волн от 1 мм до 40 см [1, 2, 13].

Радиояркостная температура определяется выражением

$$T_{я} = \varepsilon T,$$

где T — температура объекта;

ε — излучательная способность объекта.

Так как излучательная способность в СВЧ диапазоне одолетнего морского льда равна 0,95, многолетнего 0,8—0,9, а воды 0,36—0,5, микроволновый метод позволяет уверенно определять кромку льдов и их сплоченность.

Различие в излучательной способности одолетних и многолетних льдов невелико, однако при неучете возрастного состава ошибки определения сплоченности могут достигать 2—3 балла. С другой стороны, если априорно известно, что ледяной покров сплошной, имеется возможность приближенного определения количества многолетних льдов, но только по трем градациям — отсутствие, включение (до 4 баллов) и преобладание (более 5 баллов).

Эти выводы подтверждаются анализом данных ИСЗ «Нимбус-5», который был оснащен сканирующим СВЧ радиометром, работающим в диапазоне длин волн 1,55 см, и имел разрешающую способность приблизительно 30x30 км [14].

СВЧ радиометры благодаря независимости от метеоусловий и малому энергопотреблению обеспечивают регулярность наблюдений и являются весьма перспективным средством спутниковых ледовых наблюдений.

Использование СВЧ-датчиков существенно ограничивается низкой разрешающей способностью, которая в настоящее время лежит в пределах 20—30 км. Поэтому пока их целесообразно использовать в основном в Антарктике, где полностью отсутствуют самолетные ледовые наблюдения, а северная кромка льдов как правило закрыта облачностью.

Радиолокаторы бокового обзора, которые относятся к приборам активного типа, являются наиболее перспективным и уже сравнительно широко используемым прибором для дистанционного зондирования морских льдов с самолетов и спутников.

Радиолокационные станции бокового обзора (РЛСБО), установленные на самолетах ледовой разведки, позволяют определять большинство характеристик ледяного покрова вне зависимости от освещенности и практически при любых метеоусловиях.

Вдольфюзеляжная самолетная антенна РЛСБО, благодаря ее большим размерам, формирует в направлении, перпендикулярном продольной оси самолета, узкую диаграмму направленности антенны, обеспечивающую высокую разрешающую способность по линии пути, которую можно принять равной 40 м на ближнем плане и 100 м на максимальном удалении. Разрешающая способность РЛСБО по дальности зависит в основном от длительности зондирующего импульса и для станций, применяемых на ледовой разведке, равняется 30—50 м.

При полете самолета, вследствие поступательного перемещения антенного луча, осуществляется обзор местности в полосе, ширина которой в зависимости от выбранного масштаба лежит в пределах от 15 до 40 км. Обзор местности осуществляется одновременно по обоим бортам самолета, причем полоса местности непосредственно под самолетом шириной 1—2 высоты полета просматриваться не может.

Изображение наблюдается на оперативных индикаторах и записывается на фотопленку при помощи специального устройства, включающего электронно-лучевую трубку со средним и малым послесвечением и фотографическую систему.

В результате обработки радиолокационных снимков [3, 4, 7] могут быть определены следующие характеристики ледяного покрова:

- положение кромок льда с точностью $\pm 2-3$ км;
- сплоченность льда с точностью ± 1 балл при визуаль-

ном дешифрировании и $\pm 0,5$ балла при инструментальной обработке;

— возрастной состав льдов по основным градациям (ни-ласовые — молодые — однолетние — старые льды) с точностью $\pm 1-2$ балла;

— положение границ льдов различной сплоченности или возраста с точностью $\pm 2-5$ км;

— относительные площади, занимаемые льдами той или иной формы (горизонтальных размеров), начиная с обломков полей (100—500 м в поперечнике);

— размеры, конфигурацию и положение заприпайных полыней, разводий и каналов, ширина которых превышает 50 м;

— векторы дрейфа льда с точностью $\pm 1-2$ км.

Торосистость и разрушенность могут оцениваться пока только приблизительно, качественно. Это объясняется тем, что при шероховатой поверхности льда, повышающей яркость фона, не все гряды торосов могут быть опознаны, и, кроме того, при небольших расстояниях между грядами их изображение сливается в отдельные пятна. Что же касается разрушенности, то хотя изображение одних и тех же льдин и изменяется в течение летнего сезона, однако надежных корреляционных связей между характером изображения и баллом разрушенности пока не установлено.

Сжатость льда количественно и даже качественно пока оцениваться не может. Можно говорить только о вероятности (возможности или невозможности) сжатия в том или ином районе и о деформации ледяного покрова за прошедший период (по результатам повторных съемок).

Не может оцениваться возраст (толщина) однолетнего льда в диапазоне 70—200 см, заснеженность, загрязненность.

Несмотря на все указанные выше ограничения, РЛСБО могут эффективно использоваться для выполнения всех видов обзорных, оперативных и специальных ледовых разведок и специальных исследований (полигонные съемки, исследование динамики льдов) [4, 10].

Рассмотренные выше приборы дистанционного зондирования позволяют весьма эффективно картировать распределение морских льдов. Однако, так как регистрируемые сигналы зависят в основном от характера поверхности, при использовании этих приборов возраст (толщина) льда определяется, как и при визуальных наблюдениях, по косвенным признакам, недостаточно надежно и точно, особенно в диапазоне толщин 30—200 см.

Радиолокационный видеоимпульсный измеритель толщины морского льда (РВИТЛ), бортовой макет которого начиная с 1973 г. применяется для ледовых разведок [19, 20], разработан Рижским институтом инженеров гражданской авиа-

ции для непосредственного измерения толщины морского льда.

Радиолокационный метод измерения толщины морского льда $h_{\text{л}}$ основан на облучении льда специальными зондирующими радиосигналами и измерении временного интервала $\Delta t_{\text{л}}$ между раздельно наблюдаемыми сигналами, отраженными от верхней и нижней границ льда (рис. 3а, б).

$$\Delta t_{\text{л}} = 2h_{\text{л}} : V_{\text{л}},$$

где $V_{\text{л}}$ — средняя скорость распространения радиоволн в слое льда.

Минимальная высота, с которой возможно измерение толщин льда, составляет около 200 м. Диаметр облучаемого пятна при высоте полета 300 м равен 40—45 м.

Метод радиолокационного видеоимпульсного зондирования позволяет измерять толщины морских льдов с точностью не хуже $\pm 10\%$ в диапазоне толщин 45—250 см, качественно оценивать характер их поверхности (торосистость), соленость (выделять льды речного происхождения), а также оценивать по косвенным признакам (характер сигнала) многолетние льды и толщину льда в диапазоне от 0 до 45 см [8].

Распознавание объектов и их физических свойств (характеристик) производится в процессе интерпретации, которая заключается в установлении корреляционных связей между объектами и их изображениями или зарегистрированными от них сигналами.

Как известно, индикаторы или дешифровочные признаки делятся на прямые, косвенные и логические. В соответствии с сущностью дистанционного зондирования, основным прямым дешифровочным признаком

следует считать интенсивность собственного или отраженного излучения в свойственном данному прибору диапазоне спектра электромагнитных волн.

Интерпретация по этому признаку уже в настоящее время может выполняться автоматически, с использованием

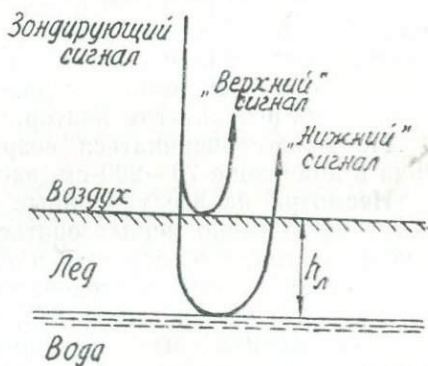
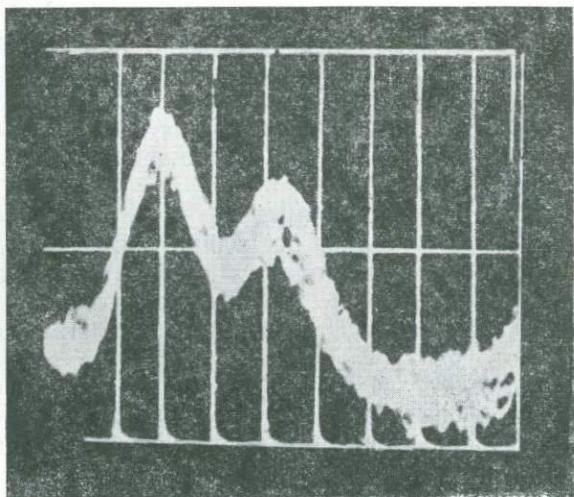


Рис. 3. Радиолокационный метод измерения толщины морского льда:

а) — принципиальная схема разделения сигналов от верхней и нижней поверхности льда;

универсальных цифровых ЭВМ. Однако при реализации метода мы сталкиваемся с несколькими принципиальными затруднениями:



б) — сигнал, наблюдавшийся на экране визуального индикатора прибора при полете над льдом большой солености толщиной 78 см.

— амплитуда сигнала может мало зависеть от вариаций изучаемой характеристики или же зависит только в определенных градациях ее;

— обычно имеются другие объекты с одинаковыми для данного диапазона свойствами (лед и облачность, лед и заснеженная поверхность суши и т. д.);

— амплитуда сигнала зависит кроме определяемой характеристики еще и от других, также неизвестных, факторов;

— однородные участки подстилающей поверхности имеют размеры меньше, чем элемент разрешения прибора на местности;

— инструментальные погрешности и влияние промежуточной среды часто не могут быть учтены с достаточной точностью.

Для того, чтобы как-то обойти эти затруднения, съемки выполняются одновременно в нескольких диапазонах, ведутся работы по повышению разрешающей способности, при интерпретации привлекаются данные по калибровочным участкам.

Однако основной путь повышения достоверности интерпретации — использование помимо основного и всех остальных прямых, косвенных и логических признаков (размеры,

форма объектов, текстура и структура изображения, взаимосвязь с окружающими объектами, пространственные и временные ограничения и т. д.). В этом случае интерпретируются уже не отдельные элементы, а все изображение в целом.

Так как задача создания метода машинного распознавания образов еще не решена, интерпретация видеoinформации дистанционных датчиков выполняется сейчас и будет выполняться в ближайшие годы в основном визуальными методами с привлечением ЭВМ только для нахождения отдельных количественных оценок.

Рассмотренные дистанционные датчики, при условии их комплексного использования, позволяют определять, за небольшим исключением, все основные характеристики ледяного покрова с точностью, не уступающей, а в ряде случаев значительно превосходящей точность визуальных ледовых наблюдений (см. табл. 4).

Например, возраст льдов в диапазоне толщин от 0 до 120 см может определяться при помощи ИК радиометров (принимая за реперные точки участки чистой воды и многолетних льдов или ледников), в диапазоне от 50 до 250 см — радиолокационным видеоимпульсным измерителем толщины морского льда, многолетние льды уверенно опознаются и оцениваются количественно РЛСБО. Аналогично обстоит дело и с другими характеристиками. Только разрушенность льдов, заснеженность и сжатия пока не могут дистанционно регистрироваться и количественно оцениваться.

Возможность с внедрением инструментальных методов регулярного определения дрейфа льдов и подвижек позволяет совершенно по новому подойти к наблюдению ледяного покрова, проследившая историю его возникновения и развития как в глобальном, так и в региональном масштабах. При этом ряд характеристик помимо прямых наблюдений может получаться и расчетным путем (толщина молодых льдов, если известна дата начала ледообразования и сумма градусодней мороза, границы зон двухлетних и многолетних льдов и т. д.). Некоторые сравнительно медленно изменяющиеся характеристики, такие, как возраст, торосистость, заснеженность, загрязненность, разрушенность, полученные при помощи средств с малым пространственным охватом (РЛСБО, толщиномер, профилометр, ледокольные вертолеты) могут накапливаться, учитывая по данным ИСЗ перемещение отдельных участков ледяного покрова. Это дает возможность по ограниченному сведениям, получаемым в результате обработки спутниковой информации, иметь полное представление о всех параметрах, характеризующих состояние ледяного покрова в интересующем практику районе.

Точность определения характеристик ледяного покрова
визуальными и инструментальными методами

Характеристика	Принятая шкала	Визуальные наблюдения		Инструментальные методы		
		Состав наблюдений	Точность (\pm)	Состав наблюдений	Точность (\pm)	Средства
Сплоченность	0—10 б	S льда	1,9 б	S льда	1 б	ТВ, ИК, РЛСБО
Возрастной состав	0—10 б	S льда каждого возраста	1,2—2,3 б	S льда каждого возраста	1 б	РЛСБО, РВИТЛ
Формы	0—10 б	S больших полей	2 б	S всех форм	1—2 б	ТВ, ИК, РЛСБО
Положение ледовых границ	φ, λ	Положение относительно самолета и счисление его координат	4—15* км	Координаты на снимке и координаты носителя	2—5* км	ТВ, ИК, РЛСБО
Сжатие	0—3 б	Косвенные признаки	1 б	Только вероятность	—	ТВ, РЛСБО
Дрейф льда	Вектор	Определение невозможно	—	Перемещение ледяных полей	2—3 км 1—2 км	ТВ, ИК РЛСБО
Торосистость	0—5 б	Качественная оценка	1—2 б	Качественная оценка	2 б	РЛСБО
				Число гряд на единицу пути	1—2 гряды	ЛП
Заснеженность	0—3 б	Толщина снега	1 б	Определение невозможно	—	—
Загрязненность	0—3 б	S загрязненного льда	1 б	« — »	—	—
Разрушенность	0—5 б	Косвенные признаки	1 б	Дешифровочных признаков не найдено	—	—
Каналы	φ, λ ширина	Положение Ширина	4—15* км 1/5 ширины	Положение Ширина	3—4* км 50 км	ТВ, ИК, РЛСБО РЛСБО

S — относительная площадь

* — при протяженности маршрутов 50—600 км

Уровень разработки дистанционных средств зондирования ледяного покрова и методов обработки данных позволяют уже в настоящее время полностью перейти на инструментальные методы ледовых наблюдений. При этом качество ледовой информации не только не ухудшится, но напротив, существенно повысится.

Для решения всех задач научно-оперативного обеспечения мореплавания и народного хозяйства, численного гидрометеорологического прогнозирования, режимных исследований и климатического мониторинга необходима не только полная, достоверная и количественная, но и разномасштабная информация — от глобальной, охватывающей все полушарие, но имеющей сравнительно низкое пространственное и временное разрешение, до детальных съемок весьма ограниченных площадей и районов.

Для удовлетворения этих требований уже в настоящее время, в рамках существующей системы сбора ледовой информации, используются, или в ближайшем будущем могут быть включены в нее следующие измерительные комплексы (группы датчиков дистанционного зондирования, объединенные общим носителем):

1. ИСЗ, оснащенные сканирующими телефотометрами, ИК радиометрами, сканирующими и несканирующими СВЧ радиометрами, РЛСБО;

2. Самолеты оборудованные РЛСБО, радиолокационным толщиномером льда, лазерным профилометром, аэрофотоаппаратом;

3. Вертолеты, базирующиеся на ледоколах и отдельных пунктах побережья, имеющие на борту радиолокационный толщиномер льда и лазерный профилометр.

Ледовая информация в необходимых объемах должна будет также поступать в региональные пункты сбора от дрейфующих автоматических радиогидрометеорологических станций (ДАРГМС), дрейфующих и полярных станций, ледоколов и судов, экспедиций.

Необходимость использования для полной характеристики ледяного покрова большого числа измерительных комплексов и дистанционных датчиков в сочетании со сравнительной сложностью интерпретации и обработки приводят к необходимости, с одной стороны, максимально возможной автоматизации обработки, а с другой — объединения всех датчиков и измерительных комплексов в единую систему.

Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом начиная с 1976 г. разрабатывается Автоматизированная ледово-информационная система для Арктики («АЛИСА»), которая должна будет обеспечивать не только сбор текущей ледовой информации, но и выполнение чис-

ленными методами, на основании гидродинамических моделей, расчетов и прогнозов состояния льда, а также создание банка данных [9].

В 1978 г. для обеспечения экспериментального рейса д/э «Капитан Мышевский» под проводкой а/л «Сибирь» был задействован в опытным порядке прототип системы «АЛИСА». Высокая оценка со стороны моряков поступавшей при этом в их распоряжение информации [15] подтверждает правильность положенных в основу создания системы принципов и путей их реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В. В. Радиозондирование льда.—Л., Гидрометеониздат, 1975, с. 63.
2. Богородский В. В., Козлов А. И., Тучков Л. Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л., Гидрометеониздат, 1977, с. 224.
3. Борисов Р. А., Быченков Ю. Д. Точность географической привязки снимков радиолокационной станции бокового обзора «Торос». Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 58—64.
4. Борисов Р. А., Лошилов В. С. Оперативный анализ дрейфа и деформации ледяного покрова по материалам повторных радиолокационных съемок.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 65—74.
5. Бушуев А. В., Волков Н. А., Лошилов В. С. Атлас ледовых образований. Л., Гидрометеониздат, 1974, с. 139.
6. Бушуев А. В., Лошилов В. С. Точность авианаблюдения и картирования морских льдов.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1967, т. 257, с. 84—92.
7. Бушуев А. В. Аналитическое координирование площадных и маршрутных радиолокационных съемок.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 46—57.
8. Бушуев А. В., Лазарев Э. И., Финкельштейн М. И. Некоторые результаты использования радиолокационного измерителя толщины морского льда для ледовой разведки.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 114—121.
9. Бушуев А. В., Волков Н. А., Гудкович З. М., Новиков Ю. Р., Прокофьев В. А. Автоматизированная ледово-информационная система для Арктики.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 6—16.
10. Горбунов Ю. А., Лосев С. М. Динамика льдов в прибрежных районах по данным боковой радиолокационной съемки с самолета.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1975, т. 326, с. 104—113.
11. Доронин Ю. П. Методика расчета толщины и температуры льда.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1964, т. 267, с. 127—142.
12. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ «Метеор». Временная инструкция. Л., Гидрометеониздат, 1978, с. 132.
13. Кондратьев К. Я., Рабинович Ю. И., Тимофеев Ю. М., Шульгина Е. М. Микроволновое дистанционное зондирование окружающей среды. Обнинск, 1975, с. 112.

14. Лошилов В. С. Использование микроволновых спутниковых измерений для картирования морских льдов.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 40—45.

15. Майнагашев Б. С., Чубаков К. Н. Три тысячи миль во льдах. —«Вокруг света», 1978, № 12, с. 1—4.

16. Масанов А. Д. Определение характеристик ледяного покрова по спутниковым снимкам сканирующих инфракрасных радиометров.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 26—33.

17. Номенклатура морских льдов, условные обозначения для ледовых карт.—Л., Гидрометеиздат, 1974. с. 86.

18. Реутов А. П., Михайлов Б. А., Кондратенко Г. С., Бойко Б. В. Радиолокационные станции бокового обзора. Советское радио. М., 1970, с. 360.

19. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Кутнев В. А., Глушнев В. Г. О дистанционном измерении толщины морского льда методами радиолокации.—Тр. Аркт и антаркт науч.-исслед. ин-та, 1975, т. 326, с. 51—58.

20. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И. Радиолокационный видеоимпульсный измеритель толщины морского льда как новое перспективное средство ледовой разведки.—Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-та, 1977, т. 343, с. 104—113.

21. A System for the Treatment of Airborne Profilometer Data of Ice: DREO Report N 725. Ottawa, 1975.

22. Laser Profilometry in Canada. W. J. Ice climatology and applications division Atmospheric Environment Service.—Department of the Environment, Ottawa, Canada, 1978, 9 p.

23. Hibler J. D. Removal of Aircraft Altitude Variation from Laser Profiles of the Arctic Ice Pack. —Journal of Geophysical Research. Wash. 1972, vol. 77, N 36 p. 7190—7196.

К. Я. КОНДРАТЬЕВ

РОЛЬ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ КЛИМАТА

Проблема климата всегда занимала в географии очень важное место. Именно этим определялся интерес таких выдающихся географов, как А. И. Воейков, к исследованиям климата.

В наше время, возрастающая актуальность проблемы климата и его изменений, обусловленных как естественными, так и антропогенными факторами, выдвигает на передний план задачу слежения за климатом и его изменениями [1—18]. Сложность взаимодействующих между собой процессов в системе «атмосфера-океаны-континенты-криосфера-биосфера», которые ответственны за формирование климата, диктует необходимость слежения за обширной совокупностью параметров, характеризующих не только климат сам по себе, но также разнообразные свойства атмосферы, океана, суши и ледяного покрова.

Естественно, что основой для определения необходимой совокупности параметров и требований к ним должно быть численное моделирование климата, имеющее целью планирование глобальной системы мониторинга климата. Хотя этот аспект теории разработан слабо, использование данных наблюдений для сопоставления с результатами численного моделирования климата и оценки адекватности различных методик параметризации процессов, влияющих на климат и его изменения, занимает центральное место в разработке теоретических моделей климата.

Особо важное значение приобретает проблема слежения за антропогенно обусловленными факторами климата [10]. Нетрудно судить о том, каковы возможные антропогенные факторы современных глобальных изменений климата, но совсем иная ситуация существует в отношении доказательств влияния человека на глобальный климат, хотя в региональных и локальных масштабах такие доказательства сущест-

вуют. Подобная ситуация обусловлена главным образом трудностью разделения естественных и антропогенно обусловленных воздействий при гораздо более мощных природных источниках энергии. Так, например, поглощение солнечной радиации таким естественным загрязнителем, как сахарский аэрозоль, полностью доминирует над антропогенными эффектами.

По-видимому, пока еще не существует средств наблюдений, способных обнаружить антропогенные изменения климата в глобальных масштабах. Одна из трудностей в связи с этим состоит в несовершенстве теории климата, что затрудняет решение вопроса о тех параметрах и факторах климата, за которыми необходимо следить. Тем не менее ясно, что к подобным характеристикам, в частности, относятся (наряду со «стандартными» метеорологическими параметрами): интегральная и спектральная солнечная постоянная, радиационный баланс, облачность, температура поверхности океана, альbedo подстилающей поверхности, осадки над океанами, влажность почвы, речной сток, теплосодержание верхнего слоя океана, сдвиг ветра у поверхности, топография поверхности океана, поверхностные течения, глубинная циркуляция океана, протяженность снежного покрова, зоны таяния и дрейф морских льдов, толщина полярного ледяного покрова и его деформация и динамика границ, общее содержание в атмосфере и вертикальные профили концентрации водяного пара, углекислого газа и аэрозоля, прозрачность атмосферы. Несомненно, что слежение за всеми параметрами климата следует осуществлять с использованием совокупности как обычных, так и космических средств наблюдений.

В связи с подготовкой к осуществлению Всемирной климатической программы под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) были проведены рабочие совещания экспертов с целью сформулировать требования к определению параметров и факторов климата. Созванное объединенным оргкомитетом (ООК) по ПИГАП и Специальным комитетом по изучению океана (СКИО) совещание специалистов (Киль, 6—8 ноября 1978 г.) обсудило вопрос о роли океана в глобальном тепловом балансе (имеются в виду масштабы времени от нескольких недель до нескольких десятилетий).

Предпринятые А. Оортом и Т. Вондер Хааром исследования среднемесячного и среднегодового теплового баланса Северного полушария на основе использования данных спутниковых измерений радиационного баланса системы «земная поверхность-атмосфера», измерений теплозапаса верхнего слоя океана, результатов вычислений меридианального пе-

переноса энергии в атмосфере по аэрологическим данным показали, что меридиональный перенос тепла в океане через круг широты в умеренных широтах, определяемый как остаточный член, составляет $3 \cdot 10^{15}$ Вт. Если меридиональный перенос в атмосфере доминирует в высоких широтах, то для переноса энергии из тропического пояса характерно преобладание океанического компонента. Меридиональный перенос тепла в океане через параллель 20° с. ш. обладает сильным годовым ходом ($0-5 \cdot 10^{15}$ Вт).

Эти важные выводы выдвигают целый ряд вопросов, связанных с выявлением механизмов переноса энергии в океане (мезомасштабные вихри, вертикальная меридиональная циркуляция и др.), что в первую очередь определяет необходимость получения большей информации об океане. Несмотря на прогресс спутниковых наблюдений, даже в случае изучения температуры поверхности океана (ТПО) основным источником информации об аномалиях ТПО остаются судовые наблюдения. Это обуславливает первостепенную актуальность использования специализированных НИС и теоретического обоснования оптимальной системы слежения за состоянием океана.

Большое значение для совершенствования судовых наблюдений имеет применение таких достижений, как: спутниковая система географической координатной привязки, обеспечивающая точность порядка десятка метров и лучше; акустический метод измерения относительной скорости течений (по отношению к движущемуся судну), позволяющий определять профиль вектора скорости ветра до глубины порядка нескольких сотен метров; новая аппаратура для получения гидрофизических разрезов слоя $0-400$ м; судовые ЭВМ — терминалы, связанные через спутник с наземными вычислительными центрами. Важный вклад должны внести наблюдения с автоматических морских буев.

Методики спутниковой дистанционной индикации перспективны для определения следующих параметров: ТПО (надежность этих данных пока что недостаточна); средняя высота поверхности (достигнутая в настоящее время точность достаточна лишь для восстановления сильных морских течений на основе геострофического приближения); спектр волнения и ветер у поверхности. Применение береговой и корабельной доплеровской аппаратуры позволяет восстанавливать течения в радиусе десятков километров с разрешением около нескольких километров.

Упомянутое совещание одобрило в целом предложенную СССР Программу исследований взаимодействия океана и атмосферы в интересах развития долгосрочных прогнозов погоды теории климата (программа «Прогноз»), но пришло

к выводу о необходимости дальнейшего изучения вопроса о выявлении тех частей Мирового океана, которые следует рассматривать как приоритетные с точки зрения их влияния на формирование долгосрочных аномалий погоды и климата. В этой связи рекомендовано осуществление в 80-х гг. поисковой программы слежения за океаном как предваряющей будущую программу слежения в интересах исследований климата и его возможного прогноза. Хотя поисковая программа должна охватывать все океаны, главное внимание следует уделить Атлантическому океану, ввиду существенной специфики спектра изменчивости его характеристик по сравнению с Тихим океаном (это следует из данных программы «Норпакс» по Тихому океану).

Ведущая роль океанов с их гигантской тепловой инерцией в формировании изменчивости климата отнюдь не заслоняет важности изучения процессов на поверхности суши. Именно поэтому на специальной сессии, созванной в декабре 1978 г., рабочая группа «Процессы на поверхности суши» Объединенного оргкомитета (ООК) по ПИГАП обсудила требования, предъявляемые трехмерными численными моделями общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и климата к параметризации процессов на поверхности суши. Численные эксперименты показали, что ОЦА наиболее чувствительна к таким характеристикам, как влажность грунта и альbedo подстилающей поверхности.

При отсутствии снежного покрова необходимо принимать во внимание следующие пять существенных характеристик, отражающих соответствующие процессы взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности: испаряемость, которая определяется через градиент отношения смеси; эвапотранспирация; температура поверхности, входящая в уравнение теплового баланса поверхности, которое служит граничным условием; влажность грунта, определяемая уравнением водного баланса поверхностного слоя грунта; сток, задаваемый эмпирической формулой.

Параметризация процессов в снежном покрове во многих отношениях аналогична трактовке слоя грунта: снег накапливается, если температура поверхности $T < 273$ К; если температура снежного покрова выше 273 К, происходит таяние, обеспечивающее поддержание температуры поверхности, равной 273 К; образовавшаяся в результате таяния снега вода проникает в грунт, увеличивая его влажность; альbedo поверхности постепенно возрастает по мере аккумуляции снега до определенного максимального значения. К числу наиболее важных неучитываемых факторов относятся: так называемое «хладосодержание» снежного покрова, обуславливающее замерзание проникающей в снег воды до

тех пор, пока температура всего снежного покрова не достигает 273 К; способность снежного покрова удерживать воду. Оба эти фактора вызывают задержку просачивания растаявшей воды в грунт.

Решение задач параметризации процессов на поверхности суши требует получения гидрологических данных трех категорий. В первую категорию постоянных параметров входят: активная глубина слоя грунта, его пористость и характеристики просачивания воды. Наиболее существенным переменным параметром второй категории, определяющим состояние грунта, является его влажность. К третьей категории параметров, используемых для калибровки (эти параметры предвычисляются моделью), принадлежат: осадка, сток и эвапотранспирация. Большое значение для определения гидрологических параметров имеют сведения о растительном покрове.

С точки зрения требований к данным наблюдениям исключительно важную роль играет информация об альбедо и его зависимости от типа, густоты и состояния растительности: типа и влажности грунта; состояния снежного покрова; высоты Солнца; спектрального распределения падающей радиации; соотношения между прямой солнечной и рассеянной радиацией. Соответствующие данные должны быть получены с осреднением порядка 100x100 км. Необходимы сведения об излучательной способности поверхности, теплоемкости и теплопроводности, протяженности и свойствах снежного покрова (глубина, водосодержание, суммарная масса и водный эквивалент, теплосодержание), ледяном покрове (толщина морских льдов, их альбедо, теплопроводность, температура поверхности и наличие снежного покрова). Весьма актуальна разработка дистанционных методов определения следующих параметров: альбедо, характеристики растительного покрова, температура подстилающей поверхности, количество облаков, протяженность и толщина ледяного покрова, протяженность водных бассейнов, тип и влажность грунта.

Естественно, что в глобальной системе мониторинга климата решающее значение должно иметь использование космических средств наблюдений, хотя следует подчеркнуть, что это отнюдь не умаляет необходимости дальнейшего развития обычных методов (наземных, корабельных, самолетных, аэростатных). В связи с этим представляют интерес рекомендации, разработанные Стокгольмской конференцией 1974 г. и планы спутникового мониторинга климата, намечаемые в США. Система мониторинга является органической частью широкой программы исследований климата

вообще как в рамках национальных программ [18], так и международных усилий.

Наиболее широкой программой наблюдений, цель которой состояла в изучении глобальной погоды, климата, явился Первый глобальный эксперимент ПИГАП (ПГЭП). В число параметров, определяемых требованиями ПГЭП (глобального метеорологического эксперимента—ГМЭ) и подпрограммы ПИГАП по динамике климата (ПИГАП-климат), входит целый ряд таких характеристик земной поверхности, которые наиболее адекватно могут быть определены при помощи методов космической дистанционной индикации. К таким характеристикам принадлежат температура подстилающей поверхности, поля скорости ветра у поверхности океана и скорости морских течений, влажность грунта, параметры снежного и ледяного покровов.

Существующие и планируемые спутники позволяют осуществлять дистанционную индикацию характеристик, перечисленных в табл. 5, с обеспечением указанных здесь требований к пространственной, временной разрешающей способности и точности. Так, например, метеорологические спутники третьего поколения «Тайрос—N», которые начали функционировать в 1978 г., позволяют при помощи усовершенствованного ИК радиометра очень высокой разрешающей способности (УРОВР) повысить точность определения температуры поверхности океана с современного уровня $1,5—2^{\circ}\text{C}$ (для пространственной сетки с шагом 100 км) до 1°C и лучше, обеспечивая при этом картирование при пространственной сетке с шагом до 50 км. В этом случае треть из требований, упомянутых в табл. 5, будет удовлетворено при поле зрения УРОВР, обеспечивающем разрешение около 1 км.

Установленный на спутниках «Нимбус-7», и «Сисат-1» пятиканальный микроволновый радиометр позволяет (при сетке с шагом 100 км) достичь точности определения температуры поверхности океана около $1,5^{\circ}\text{C}$ при обеспечении всепогодности измерений. Разработанная ранее ИК аппаратура удовлетворяет требованиям определения температуры поверхности снега, льда и подстилающих поверхностей суши. Наличие в последнем случае сильного суточного хода делает необходимым использование геостационарных спутников.

Применение аппаратуры пассивной и активной радиолокации на спутниках «Нимбус-7» и «Сисат-1» открыло возможности оценки скорости ветра у поверхности океана с точностью 2 м/с (при сетке с шагом 50 км и 36 час. повторности). Осреднение по площади 200×200 км за 5—10 суток обеспечит удовлетворение требований, указанных в

Таблица 5

Требования к характеристикам подстилающей поверхности, определяемым методами космической дистанционной индикации, с точки зрения программы ПИГАП-климат

Параметр	Пространственное разрешение, км	Временное разрешение (повторность), сут.	Точность
Температура поверхности океана	200	5—10	0,5—1,5° С
	500	5—10	0,5—1,5° С
	Максимальное возможное	30	0,5—1,5° С
Температура поверхности суши и ледяного покрова	100	5	1,0° С
	500	5	1,0—3,0° С
Касательное ветровое напряжение у поверхности океана	200	5—10	0,1—0,4 дин/см ²
Морские течения и вихри	200	5—10	2—10 см (топография)
Протяженность ледяного покрова	100	5	Наличие/отсутствие
	100	5—15	»
	50	5—15	»
Толщина ледяного покрова	200	13—30	10—20%
Таяние ледяного покрова	50	5	да/нет
Дрейф ледяного покрова	400	1	5 км
	100	5	наличие/отсутствие
Протяженность снежного покрова	100	5—15	»
	100	5—15	»
	50	5—15	»
Влажность грунта	100	5	10% полевой влагоемкости
	500	15	2 уровня
Альbedo подстилающей поверхности	100	5	0,1—0,3
	500	5—15	?

табл. 1. В дальнейшем возможно повышение точности оценки скорости ветра до 1 м/с (при сетке с шагом 25 км).

Существующие сканирующие ИК радиометры позволяют идентифицировать границы зон морских течений и вихрей при наличии температурных контрастов около 2° С. Достигнутая при помощи радиовысотомера, установленного на геостационарном спутнике «ГЕОС-3», точность измерений

топографии морской поверхности около 50 см еще недостаточна для удовлетворения требований ПИГАП-климат. Необходимую точность порядка 10 см (при шаге сетки, равном 20 км, и осреднении за 5—1% суток), обеспечит радиовысотомер океанологического спутника «Сисат-1». Эта точность может быть в дальнейшем повышена до 2—10 см.

Детально разработана в настоящее время методика анализа спутниковых изображений с целью изучения пространственной структуры ледяного покрова (в частности, отфильтрования облачности). Микроволновая дистанционная индикация сделала эту методику всепогодной и открыла возможность надежного различия открытой воды, тонкого, однолетнего и многолетнего льдов, а также оценки толщины ледяного покрова [15]. Различение типов льда и последующая оценка его толщины возможны также по данным измерений при помощи скаттерометров. Важным средством слежения за ледяным покровом являются радиолокаторы бокового обзора (РБО). Радиолокатор с синтезированной апертурой, обеспечивающий очень высокое пространственное разрешение (около 25 см), был установлен на спутнике «Сисат-1».

Контрасты яркости в видимой области спектра, регистрируемые при помощи УРОВР, а также четырехканальных сканирующих фотометров спутников «Метеор» и «Лэндсат», позволяют выявлять зоны тающего льда и снега. Этой же цели могут служить данные микроволновых измерений благодаря сильному контрасту излучательной способности воды и льда (или снега). Радиотепловые изображения обладают, однако, слишком низкой пространственной разрешающей способностью (20—30 км) для слежения за дрейфом льда (в частности айсбергов). Для этой цели значительно более пригодны данные РБО. Другая возможность состоит в слежении со спутников за дрейфом морских буев.

Требования к слежению за протяженностью снежного покрова удовлетворяются уже существующими данными. Совместное использование изображений в видимой и близкой инфракрасной областях спектра позволяет получить информацию об изменениях структуры снежного покрова и, в частности, таяния. Полученные ранее результаты выявили хорошую корреляцию между динамикой протяженности снежного покрова и речным стоком. Пока что разработаны лишь очень грубые дистанционные методы оценки толщины снежного покрова [15]. Разработка методик дистанционной индикации влажности грунта находится на первоначальной стадии развития. Для решения этой задачи наиболее пригодны данные многоканальных микроволновых измерений. Требуют дальнейшего развития методы определения

альbedo подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений. Принципиально важное значение имеет создание эффективных возможностей наземной обработки всех получаемых данных.

Национальное управление по авиации и космическим исследованиям США (НАСА) предприняло разработку десятилетней программы исследований климата, основу которой составляет подготовка и осуществление системы слежения за параметрами климата и дальнейшее совершенствование методов численного моделирования климата и его изменений в соответствии с общей американской программой изучения климата, цель которой состоит в том, чтобы предвидеть флуктуации климата и их национальные и международные аспекты, а также выявить возможное влияние человека на климат в региональном и глобальном масштабах.

Современная глобальная система слежения за параметрами климата опирается на использование метеорологических, ресурсных и океанографических спутников, а также результатов наблюдений, с пилотируемых орбитальных станций. В СССР метеорологическую космическую систему составляют спутники «Метеор», а задачи изучения природных ресурсов решают спутники «Метеор-Природа». В 1979 г. запущен первый советский океанографический спутник.

В США метеорологические наблюдения из космоса обеспечиваются как спутниками третьего поколения «Тайрос-N», так и метеорологическими спутниками министерства обороны «Блок-5Д». Важную роль играют экспериментальные метеорологические спутники серии «Нимбус» и ресурсные спутники «Лэндсат». В 1978 г. запущен первый американский океанографический спутник «Сисат-1». В настоящее время функционирует система геостационарных метеорологических спутников, принадлежащих США, Японии и Европейскому космическому агентству.

Наиболее важные изменения в целях системы наблюдений состоят в расширении океанографических и климатологических наблюдений, а также получении количественной информации, необходимой для численных мезометеорологических прогнозов (подобная информация должна прежде всего обладать высоким пространственно-временным разрешением). Данные СОМС должны также найти применение для решения различных задач в интересах сельского хозяйства, гидрологии, авиации, промышленности, туризма.

Принципиально новыми особенностями функционирования НОМС являются: использование ТКК для доставки спутников и (если необходимо) ремонта аппаратуры на орбите; применение бортовой системы глобальной координатной при-

вязки данных наблюдений (СГКП) и передача в наземный центр (НЦ) приема и обработки количественной информации о географически привязанных физических величинах; использование схемы передачи информации «НОМС-ГСОС-НЦ», отображающее, в частности, единство и взаимосвязанность всех компонентов СОМС. Наряду с этим, будет существовать и система непосредственной передачи данных НОМС.

Наличие системы несолнечносинхронных НОМС позволяет в течение года накопить массив данных наблюдений, относящихся к любому моменту местного солнечного времени в пределах $\pm 1,5$ часа. Обслуживание при помощи ТКК обеспечит продолжительность жизни НОМС более 10 лет. Малая высота орбиты НОМС открывает широкие перспективы применения активного (лидарного и радиолокационного) зондирования. Важной функцией НОМС является опрос (через каждые 3 часа) автоматических платформ (наземные станции, морские буи, баллоны) с последующей географической привязкой и передачей полученных данных в НЦ через ГСОС (это вызывает задержку получения данных, составляющую всего 59 мин). Осуществляемые ГСОС функции связи (включающие также передачу обработанной информации из НЦ в региональные центры и другим потребителям) рассматриваются как столь же важные, что и получение данных наблюдений.

В табл. 6 содержится сравнение перечня дополнительной научной аппаратуры, используемой на спутниках СОМС,

Таблица 6

Сравнение дополнительного комплекса научной аппаратуры СОМС и аппаратуры, повторяющей использованную на спутниках «Тайрос-N»

Параметры	Аппаратура	
	«Тайрос-N»	СОМС
1	2	3
Погода		
Вертикальные профили температуры и влажности	Фильтровый ИК зондировщик ИК зондировщик с модуляцией давлением Микроволновой зондировщик	Лидарный зондировщик температуры и влажности (ЛЗТВ) Пассивный ИК зондировщик сверхвысокого разрешения (ИКСВР) Усовершенствованный пассивный микроволновый зондировщик (УМЗ)
Наземное давление	Н	Лидарный зондировщик давления (ЛЗД)

1	2	3
Профиль ветра	Н Слежение за облаками, У	Радиолокационный датчик наземного давления (РДНД) Лидарный датчик ветра (ЛДВ)
Температура поверхности океана	Двухканальный сканирующий радиометр (ДСР), У	Активно-пассивная система для получения микроволновых изображений (АПСМИ)
Облачный покров	»	»
Осадки Климат (океан)	Н	Метеорологический радиолокатор (МРЛ)
Касательное ветровое напряжение	Н	АПСМИ Скатерометр (СК)
Уровень поверхности океана	Н	Радиовысотомер (РВ)
Температура поверхности океана и скорость ветра Климат (радиационный баланс)	Морские буи (сбор данных)	
Радиационный баланс	Аппаратура для измерений радиационного баланса Земли (АРБ)	
Альbedo поверхности	ДСР	
Солнечная постоянная	Полостной радиометр	
У. ф. солнечная радиация Климат (суша гидрология, растительный покров)	У. ф. монохроматор (УФМ) для измерений уходящей радиации	
Влажность поверхностного слоя грунта	Н	АПСМИ
Растительный покров Климат (криосфера)	ДСР	
Морской лед (сплоченность)	Н	АПСМИ
Снежный покров	ДСР	

1	2	3
Водосодержание снега	Н	АПСМИ
Уровень поверхности льда	Н	РВ
Граница континентального ледяного покрова		Радиолокатор бокового обзора (РБО)
Загрязнение атмосферы и малые компоненты		
Стратосферный аэрозоль	Н	Аппаратура для затменных измерений ослабления солнечной радиации (АЗИ)
Тропосферный аэрозоль	Н	Аэрозольный лидар (АЛ)
Озон	УФМ	
Стратосферный водяной пар	Н	Лимбовый зондировщик (ЛЗ)
N ₂ O, NO _x , CH ₄ , фреоны и др.	Н	Дифференциальный корреляционный радиометр ДКР (тропосфера) и ЛЗ (стратосфера)
Параметры околоземной космической среды		
Потоки солнечных протонов и электронов	Датчики слежения за параметрами околоземной космической среды	

с составляющим основу СОМС аппаратурным комплексом «Тайрос-Н» (У-усовершенствованная аппаратура; Н — аппаратура, отсутствовавшая на «Тайрос-Н»). Низкая разрешающая способность вертикальных профилей температуры, восстанавливаемых по ИК данным, побудила разработку ЛЗТВ с целью достичь высотного разрешения (2 км) и точности (ИК), соответствующих требований ПИГАП. Двухканальный ЛЗТВ имеет один канал, совпадающий с резонансной линией поглощения, и поблизости расположенный канал на частоте минимального ослабления.

Задачу повышения высотного разрешения должен решать и ИК зондировщик сверхвысокого разрешения (ИКСВР), разрабатываемый вариант которого предусматривает спектральное разрешение 2 см^{-1} , а в перспективе — до $0,2 \text{ см}^{-1}$ в полосе $4,2 \text{ мкм}$ CO₂ с более широкими кана-

лами в полосах 15, 3,7 и 5,7 мкм. Анализируются возможности использования спектрометра с дифракционной решеткой, снабженного «гребенкой» датчиков, интерферометра Майкельсона и эталонов Фабри-Перо. ЛЗД обеспечит восстановление наземного давления с необходимой точностью (0,3% или 3 мбар) при высоком разрешении, а также и определение вертикального профиля давления.

Другая возможность восстановления давления состоит в применении многоволновой РЛС и 60 ГГц полосе кислорода (РДНД).

ЛДВ представляет собой когерентный импульсный лидар в 15 мкм полосе углекислого газа. Индикатором ветра является дрейф атмосферного аэрозоля, прослеживаемый по данным измерений доплера смещения эхо-сигнала при двух-трех углах визирования заданной точки по мере движения спутника.

Десятиканальный сканирующий УМЗ был уже испытан на спутниках «Сисат-1» и «Нимбус-7». Он функционирует на горизонтальной и вертикальной поляризациях на частотах 37; 21; 18; 10,69 и 6,6 ГГц. Данные УМЗ допускают восстановление следующих параметров: температура поверхности океана и осадки над океаном, касательное ветровое напряжение, сплоченность ледяного покрова, водосодержание снега, влагосодержание атмосферы, водосодержание (и, возможно, микроструктура) облаков, влажность грунта (грубая оценка). Добавление каналов 1,4 и 94 ГГц, а также трех каналов в полосе кислорода 55 ГГц, полосах водяного пара 21 и 103 ГГц существенно расширит возможности получения информации. Применение антенны, диаметром около 10 м позволит повысить разрешающую способность до 3—50 км при ширине полосы сканирования около 2000 км. Пассивная микроволновая индикация настолько перспективна, что заслуживает очень большого внимания.

Двухканальный МРЛ в диапазоне 1—2 см будет служить для определения интенсивности осадков: 1—10 мм/час (канал 35 ГГц) и до 200 мм/час (16 ГГц). Основным назначением применявшегося на «Сисате-1» скаттерометра на длине волны 2,1 см является восстановление скорости ветра у поверхности океана, но в сочетании с УМЗ он будет также использован для оценки возраста ледяного покрова, волнения, температуры поверхности океана и влажности грунта. Радиовысотометр на длине волны 2,2 см типа установленного на «Сисате-1» позволяет определить уровень (высоту) поверхности океана с точностью ± 10 см, скорость морских течений до минимальных значений 30—50 см/с; высоту морских волн в диапазоне 1—20 м с точностью $\pm 10\%$, картировать рельеф и физические характеристики ледяного покрова.

Наличие РБО на длине волны 22 см, аналогично входившему в состав комплекса аппаратуры «Сисат-1», позволит прежде всего получить сведения о параметрах морского волнения и ледяного покрова при пространственном разрешении 25 м и ширине полосы сканирования 100 км. АЗИ уже испытаны на спутнике «Нимбус-7». АЛ предоставляет единственную возможность восстановления профиля концентрации аэрозоля в тропосфере. Сочетание многоспектральных данных измерений обратного рассеяния и ослабления позволит определять средний размер и показатель преломления частиц аэрозоля. Данные ЛЗ и ДКР предназначены для восстановления профилей концентрации малых газовых компонентов с точностью порядка 1 ррт.

Особенностью ГСОС будущего является получение не только изображений всего видимого диска Земли, но и изображений размером 2000x2000 км или меньше для слежения за процессами региональных масштабов. Разрешающая способность изображений в видимой и инфракрасных областях спектра достигает 300 и 1000 м соответственно с повторностью до 2 мин. Спектральные измерения уходящего в полосах CO_2 , 4,3 и (или) 15 мкм позволят восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности при пространственном разрешении около 5—10 км. Для повышения высотного разрешения можно использовать более высокое спектральное разрешение (0,5—2 см⁻¹) или интерферометрическую методику с частичным сканированием.

Д. Атлас и др. обсудили перспективы микроволнового дистанционного зондирования с ГСОС. Так, например, радиометр на частоте 94 или 140 ГГц может быть применен для практически непрерывного слежения за динамикой интенсивности осадков. Большое значение для повышения пространственной разрешающей способности имеет использование крупных антенн диаметром до 100 м. Возможно, что прогресс техники позволит в будущем применять на ГСОС и средства активного зондирования. Критически важное значение имеет решение проблем обработки и распространения данных, важным компонентом которой является первичная обработка информации на борту спутников.

Результаты наблюдений при помощи метеорологических спутников детально обсуждались в ряде монографий [10—12] и обзоров [6—9, 13—15]. Поэтому мы ограничимся в дальнейшем лишь кратким обсуждением некоторых работ, опубликованных в самое последнее время.

Изображения Земли из космоса являются самым массовым видом интерпретации, широко используемым для дешифрирования характеристик облачного покрова [1], снежного и ледяного покрова [15], гидрологических параметров

[13] и многих других целей. К числу трудных проблем интерпретации изображений Земли из космоса относится различение облачного и снежного покрова, а также распознавание перистых облаков. Ученые США предложили методику решения этих задач на основе использования разработанной сотрудниками Колорадского университета системы обработки видеoinформации «АДВИСАР» в цифровой форме для исследований атмосферы, функционирующей в режиме диалога оператора с ЭВМ.

Для более надежной дифференциации снега и облаков нижнего яруса можно использовать последовательные изображения, позволяющие выявить движение облаков (память рассматриваемой системы позволяет хранить восемь изображений). Наглядным индикатором движения облаков являются разностные изображения для видимого участка спектра. Обсужденный пример представляет собой наглядную иллюстрацию перспективности анализа различным образом трансформированных изображений.

Решение важной задачи автоматической классификации типов облаков по спутниковым данным осложняется неоднозначностью многоспектрального распознавания облачности, причем опыт использования в качестве дополнительных признаков особенностей текстуры полей яркости и температуры не привел к существенному повышению надежности распознавания. Д. А. Парик и А. Розенфельд предложили алгоритм классификации типов облаков на основе анализа инфракрасных изображений облачного покрова, получаемых при помощи метеорологических спутников, который позволяет решить проблему неоднозначности распознавания путем сравнения тональных и текстурных характеристик, относящихся к дешифрированным и неизвестным участкам (сегментам) ИК изображений облачного покрова. Алгоритм состоит из двух частей: процедуры «сегментации» и процедуры классификации.

Начиная с 1960 г., когда были получены первые телевизионные изображения облачного покрова со спутников, предпринимались многочисленные попытки разработать методики оценки осадков на основе анализа изображений в видимой и инфракрасной областях спектра, полученных при помощи полярных и геостационарных спутников. К. Д. Гриффит и др. предложили и испытали новую эмпирическую методику определения интенсивности осадков из конвективных облаков для больших пространственно-временных масштабов по изображениям для видимого и инфракрасного каналасканирующей аппаратуры геостационарных спутников (первоначально эта методика была разработана для оценки осадков в районе АТЭП).

С учетом того, что зоны интенсивной конвекции и осадков в тропиках соответствуют наиболее ярким (или холодным) облакам, выполнена калибровка изображений с геосинхронных спутников АТС и ГМС/ГСОС по данным МРЛ на длине волны 10 см, которые, в свою очередь, были прокалиброваны с использованием результатов наблюдений на осадкомерной сети в южной части штата Флорида.

На примерах отдельных ураганов в Атлантическом океане за 1969—1977 гг. К. Д. Гриффит и др. показали перспективность использования методики для прогноза обусловленных ураганами наводнений. Ураганы классифицированы по величине полученных по спутниковым данным суточных сумм осадков и осадков, осредненных по площади, что позволяет различать относительно «влажные» и «сухие» штормы. Не обнаружено корреляции между осадками и интенсивностью шторма. Это свидетельствует о том, что не величина скрытой теплоты конденсации, а ее местоположение определяет интенсивность шторма.

Изображения облачного покрова, получаемые при помощи геостационарных спутников, нашли широкое применение для восстановления поля ветра. Хорошо разработанная методика восстановления крупномасштабного поля ветра по данным о движении облаков предназначена для обработки последовательных изображений облачного покрова, получаемых при помощи геостационарных спутников «АТС-3» и геостационарных метеорологических спутников серии «ГМС», которые стабилизированы в пространстве за счет вращения со скоростью около 100 об/мин. В этом случае пространственная ориентация оси вращения спутников не претерпевает заметных изменений за время получения одного изображения (30 мин). Геосинхронный спутник «АТС-6» стабилизирован по трем осям относительно земной поверхности, что обуславливает существенное изменение положения его оси не только от одного изображения к другому, но и во время получения каждого изображения, что может породить ошибки восстановления скорости ветра, превышающие 10 м/с. Кроме того, сканирующий радиометр очень высокого разрешения (СРОВР), установленный на «АТС-6» с целью получения изображений в видимой и инфракрасной областях спектра, вносит определенные искажения, которые необходимо устранять.

Следует отметить, однако, что применение трехосной стабилизации имеет серьезные преимущества перед стабилизацией вращения, позволяя обеспечивать сканирование диска Земли в течение 50—100% времени (тогда как при стабилизации вращения 95% времени занимает сканирование космоса) и открывал возможности «фокусирования» СРОВР

на отдельных участках с целью изучения таких, например, мезомасштабных явлений, как штормы. Поскольку телеметрические данные о пространственной ориентации «АТС-6», относящиеся к каждому изображению, недостаточно точны для учета изменения ориентации спутника в ходе получения изображения, была разработана методика коррекции, которая позволила учесть изменения ориентации в промежутке между отдельными изображениями (выражаемые в зависимости от номера строки сканирования) при восстановлении поля ветра с помощью самих изображений, определяя смещения края диска Земли по последовательным инфракрасным изображениям.

В. В. Кухлов и Д. К. Чаттерс выполнили обработку последовательности из трех изображений (по данным «АТС-6») за 14 июля 1974 г. вблизи точки 70° з. д. с целью восстановления поля ветра по движению кучевых облаков хорошей погоды (уровень около 950 мбар) с использованием методики измерений смещения края Земли для учета изменений ориентации оси спутника. Полученные результаты сопоставлены с совпадающим полем ветра, восстановленным по данным «ГМС-1» (высокое качество этих данных определило надежность их как эталонов для сравнения).

Среднеквадратичное отклонение, характеризующее векторные разности для отдельных небольших облаков, которые были идентифицированы на обеих сериях изображений, равно 1,6 м/с, а при обработке данных, интерполированных в узлы сетки с шагом 2° широты, составило 1,3 м/с. Эти расхождения имеют ту же величину, что и расхождения, описывающие воспроизводимость независимых результатов восстановления поля ветра по данным «ГМС-1». Можно, таким образом, считать, что обработка изображений, полученных при помощи геостационарного спутника, стабилизированного по трем осям, обеспечивает такую же точность восстановления поля ветра, что и обработка данных геосинхронных спутников, стабилизированных вращением при эквивалентном пространственном разрешении.

П. Морель и др. воспроизвели и прокомментировали три изображения Земли в полосе водяного пара (5,7—7,1 мкм), полученные при помощи геостационарного метеорологического спутника «Метеорат». Эти впервые полученные глобальные изображения в рассматриваемом канале характеризуют влажность средней тропосферы (600—300 мбар). Хотя их трудно интерпретировать количественно в терминах содержания водяного пара, рассматриваемые изображения позволяют проследить качественные особенности планетарного распределения водяного пара, выявляя, в частности, наличие: протяженной полосы повышения содержания водя-

ного пара, протянувшейся от Южной Америки до Южной Африки; четкой волнообразной зоны раздела между влажной тропической и сухой субтропической верхней тропосферой, простирающейся от Карибского моря до южного Туниса; внетропических возмущений в поле влажности. Аналогичные изображения в видимой (0,4—1,1 мкм) и инфракрасной (10,5—12,5 мкм) областях спектра в большей степени характеризуют мелкомасштабные явления по сравнению с изображениями в полосе водяного пара.

В работе Т. А. Крофта воспроизведены и проанализированы ночные изображения Земли в видимой области спектра, полученные при помощи метеорологического спутника министерства обороны США «Блок-5Д» и спутника природных ресурсов «Лэндсат». На ночных изображениях наиболее ярко проявляются: городские огни (на примере США показано, что поле яркости городских огней хорошо отображает распределение плотности населения); газовые факелы нефтепромыслов; наиболее мощные факелы зафиксированы в районах Персидского залива, Алжира, Ливии, Нигерии и Западной Сибири (оценка выбросов газа в факелы за период с 1959 по 1978 г. дала значение около $4,2 \cdot 10^3$ км³; за последние годы расход газа в факелы составил около 3% по отношению к суммарному сжиганию углеводородного топлива); костры, связанные со сжиганием остатков с/х растительности в Африке, Мексике и Австралии.

В Японском море обнаружено поле огней, созданное рыболовными судами, применяющими подсветку моря при ловле рыбы. Приведено изображение, иллюстрирующее случай полярного сияния. Городские огни, которые видны через тонкие облака, расплываются при наличии умеренно толстых облаков и полностью блокируются мощной облачностью.

Восстановление температуры подстилающей поверхности является одной из важнейших задач спутниковой климатологии [14]. Данные установленного на спутнике «НООА-3» двухканального радиометра очень высокого разрешения (РОВР) широко использовались, например, для получения увеличенных ИК изображений, характеризующих поле температуры поверхности водных бассейнов. Л. Брикер и др. предприняли сопоставление восстановленных значений температуры по данным для канала 10,5—12,5 мкм с результатами наземных контрольных измерений в трех точках. Разрешающая способность РОВР варьирует от 900 м в надире до 1500 м на краю изображения. Являющаяся характеристикой точности РОВР эквивалентная дифференциальная температура шумов составляет 1,5—2,0° С при температуре поверхности около 300К (если разность температур двух сосед-

них элементов изображения превышает дифференциальную температуру, она рассматривается как реальная).

В связи с решением задачи восстановления температуры подстилающей поверхности по данным измерений уходящего излучения в окне прозрачности атмосферы 8—12 мкм. А. К. Когли выполнил численное моделирование влияния перистых облаков с заданным вертикальным профилем температуры в облаке на перенос ИК излучения. Расчеты, сделанные для длины волны 10 мкм с использованием индикатрисы Хенье—Гринштейна, показали, что имеет место значительное различие величин уходящего излучения, вычисленных для случаев изотермического и неизотермического перистых облаков. Это различие примерно линейно возрастает с увеличением оптической толщины и вертикального градиента температуры в облаке. Рассматриваемое различие почти не зависит от асимметрии индикатрисы рассеяния и может превосходить 10%. Если различие равно 12%, это (при температуре изотермического облака 220 К) порождает ошибку определения температуры подстилающей поверхности, составляющую 23 К.

Быстро прогрессирующей областью применения спутников для получения данных о структурных параметрах атмосферы является дистанционное зондирование атмосферы [12, 13]. Здесь главные усилия направлены сейчас на повышение точности данных зондирования.

Серьезные перспективы повышения точности результатов дистанционного зондирования атмосферы открывает комплексное использование результатов измерений уходящего излучения для ИК и микроволнового диапазонов. Так, например, данные измерений уходящего излучения при помощи установленных на метеорологическом спутнике «Нimbus-6» инфракрасного радиометра высокого разрешения (ИКРВР) и сканирующего микроволнового спектрометра (СМС) регулярно использовались для восстановления вертикальных профилей температуры и точки росы. На основе сопоставления данных для 998-го витка за 25 августа 1975 г., относящихся к центральной части США, и радиозондирований В. Мойер и др. получил оценки точности восстановления. Поскольку спутниковые данные относятся к 17.00 час по среднему Гринвичскому времени, а радиозондирование — к 12.00 и 00.00 час, аэрологические данные за два срока осреднены с весами, учитывающими линейную интерполяцию во времени. Синоптическая ситуация характеризуется наличием летнего холодного фронта при замещении тропической воздушной массы полярной.

Сопоставление привело к выводу, что восстановленные профили температуры несколько менее точны, чем радио-

зондовые, причем максимальные расхождения наблюдаются вблизи земной поверхности и тропопаузы. Самое большое расхождение температур воздуха, составляющее $+7,1^{\circ}\text{C}$, имело место на уровне 115 мбар, тогда как расхождение точки росы достигало $+18,9^{\circ}\text{C}$ на уровне 475 мбар. Низкая точность восстановления температуры точки росы свидетельствует о сомнительной ценности восстановления общего содержания водяного пара в толще атмосферы.

Анализ обсуждаемого массива данных не выявил зависимости результатов восстановления от условий облачности. В тех точках, где наблюдается сильная облачность, встречались как большие, так и малые расхождения восстановленных и радиозондовых значений температуры, тогда как для почти безоблачных участков получались расхождения, существенно превосходящие средние. Достаточно удовлетворительна точность восстановления толщины изобарических слоев (за исключением самых высоких уровней). По спутниковым данным о температуре «сухого термометра» вполне уверенно распознаются устойчивые воздушные массы, но районы неустойчивости не выявляются, хотя последнее может быть обусловлено спецификой использованного массива данных.

В. Мойер и др. выполнили объективный анализ и построение пространственных полей метеоэлементов на девяти изобарических уровнях для следующих параметров: высота изобарических поверхностей, скорость и направление ветра, температура воздуха, температура точки росы, горизонтальный и вертикальный градиенты температуры. Расчет для каждого из уровней средних значений и среднеквадратических отклонений (СКО) расхождений восстановленных и радиозондовых величин показал, что: СКО расхождений, как правило, превосходят средние значения расхождений (так, например, для всего рассматриваемого массива данных среднее алгебраическое расхождение равно $0,4^{\circ}\text{C}$, тогда как СКО составляет $0,7^{\circ}\text{C}$); СКО и средние расхождения в случае геопотенциала и ветра возрастают с высотой; средние расхождения температуры и точки росы уменьшаются с высотой в тропосфере, но растут в нижней стратосфере; СКО расхождений, температуры и точки росы практически не зависят от высоты.

Анализ расхождений между восстановленными и радиозондовыми данными, построение карт спутниковых данных указывают на достаточную точность последних с точки зрения возможности использования их для выявления основных синоптических систем. Если рассматривать выявленные расхождения как обусловленные ошибками восстановления, то несомненно, что необходимо повышение восстановления и пространственной разрешающей способности. Бесспорна, од-

нако, информативность спутниковых данных в тех случаях, когда обычные данные отсутствуют.

В связи с необходимостью использовать для анализа атмосферных процессов глобального масштаба данные различных наблюдений при отсутствии надежных оценок абсолютных ошибок Ф. Д. Фингер и Р. М. Интурфф обсудили некоторые аспекты проблемы сравнимости: данных наблюдений при помощи различных радиозондов; различных ракетных зондов; восстановленных по спутниковым данным и непосредственно измеренных значений температуры и геопотенциала; измеренных со спутников и рассчитанных по данным аэрологических и ракетных зондирований величин уходящего излучения; результатов аэрологических измерений влажности. Проанализировано также влияние дополнительного использования данных дистанционного зондирования на качество прогнозов. Все рассматриваемые данные относятся преимущественно к стратосфере.

В течение нескольких лет осуществляется опыт использования данных дистанционного зондирования атмосферы со спутников, получаемых при помощи радиометров вертикального профиля температуры (РВПТ), для численных прогнозов погоды. Трудности оценки вклада спутниковых данных в повышение качества прогнозов определили ситуацию, которая характеризуется отсутствием определенных выводов по этому вопросу. Несомненно, положительным является, однако, вклад спутниковых данных в построение и анализ полей температуры и геопотенциала для уровней 5, 2 и 0,4 мбар (35, 42 и 55 км соответственно).

При существующем в настоящее время разнообразии прямых и косвенных методов зондирования атмосферы первостепенное значение имеют исследования информационного содержания данных дистанционного зондирования, что требует планирования специальных программ наблюдений с целью сопоставления результатов прямых и косвенных измерений. Несомненно, актуален анализ перспектив использования спутниковых данных для мезомасштабных прогнозов.

Спутниковая климатология радиационного баланса Земли является относительно наиболее богатой по объему полученных данных [6—10, 13]. Однако возрастающий интерес к проблеме климата и его изменений определяет актуальность дальнейших спутниковых наблюдений радиационного баланса Земли (РБЗ) и его составляющих, причем первостепенное значение приобретает повышение точности и репрезентативности измерений (с точки зрения продолжительности, глобальности и учета суточного хода). Созванное по инициативе 6-й Рабочей группы КОСПАР совещание экс-

пертов в Альтбахе (Австрия) в мае 1978 г. признало наиболее важными направления исследований РБЗ, а также требования к точности измерений и масштабам осреднения, указанные в табл. 7.

Для оценки образования доступной потенциальной энергии (ДПЭ) за счет радиационных процессов важное значение имеет расчет ковариаций лучистого притока тепла (ЛПТ), температуры и влажности воздуха. Естественно, что образование ДПЭ происходит в тех случаях, когда имеет место радиационное нагревание (выхолаживание) относительно теплого (холодного) воздуха. Данные о ЛПТ для всей толщи атмосферы могут быть использованы для грубой оценки генерации ДПЭ, а для более точных расчетов нужны сведения о вертикальном профиле ЛПТ.

Анализ данных спутниковых измерений показал, что меридианальный перенос тепла через параллель в умеренных широтах составляет около 5×10^{15} Вт, причем, если на широте 20° с. ш. он осуществляется главным образом в океане, то у 60° с. ш. доминирует перенос в атмосфере. Уточнение этих данных требует продолжительных спутниковых наблюдений. Выполненные за последние годы работы выявили возможность восстановления составляющих радиационного баланса подстилающей поверхности по данным измерений уходящего излучения с точностью, удовлетворяющей требованиям, указанным в табл. 7.

Слежение за солнечной постоянной следует осуществлять на основе координации с наблюдениями различных проявлений и характеристик солнечной активности. В случае спектральных измерений достаточно разрешения около 1 нм при длинах волн $\lambda < 300$ нм и 10 нм в области $\lambda > 300$ нм, но в ультрафиолетовом (у. ф.) диапазоне, связанном с фотохимическими процессами, необходимо более высокое разрешение. Важно при этом проследить за изменчивостью в ходе 11-летнего цикла, периода вращения Солнца и короткопериодическими вариациями.

Данные измерений РБЗ и его составляющих окажутся полезными лишь в том случае, если они будут дополнены сопутствующей информацией (температура воздуха и подстилающей поверхности, влажность воздуха, протяженность снежного и ледяного покрова, количество и высота верхней границы облаков, количество и интенсивность осадков, влагосодержание атмосферы, динамика растительного покрова, поля содержания озона и аэрозоля). Спутниковые наблюдения должны стать основным источником этой информации.

С точки зрения проверки моделей климата существенен анализ корреляционных связей между компонентами РБЗ и стандартными метеопараметрами (прежде всего — темпе-

Использование данных о радиационном балансе Земли
для изучения климата

Область	Использование	Измеряемая величина	Точность	Пространственно- временные масштабы	Пространствен- ный охват	
1	2	3	4	5	6	
1. Диагностика климата	Энергетика атмосферы	Радиационные балан- сы системы «земная по- верхность-атмосфера» и земной поверхности	± 20 Вт/м ²	2000 км, 1 мес.	Глобальный	
	Перенос тепла в океан	Радиационный баланс за период 5—10 лет	± 5 Вт/м ²	Регионы 1000—2000 км 10°—широтные зоны, 1 мес.		»
	Радиационный баланс земной поверхности	Радиационный баланс	± 20 Вт/м ²	Регионы 200—1000 км, 1 мес.		»
2. Слежение за климатом	Изменчивость внеатмосферной инсоляции	Интегральная и спек- тральная солнечная по- стоянная (для всего дис- ка Солнца)	0,5%, 0,3% (относит.)	1 мес. по крайней мере, на протяжении 11-летнего цикла	Весь диск Солнца	
	Документация изменений климата	Интегральная солнеч- ная постоянная Спектральная солнеч- ная постоянная	0,5%, 1% (в зависимости от спектраль- ного интер- вала)	Ежемесячно	Весь диск Солнца	
		Радиационный баланс Земли: глобальный	± 12 Вт/м ²	1 мес.	Глобальный	

1	2	3	4	5	6	
3. Теория климата	Проверка моделей климата	зональный	$\pm 10 \text{ Вт/м}^2$	10° широты, 1 мес.	»	
		Региональный	$\pm 20 \text{ Вт/м}^2$	1000 км, 1 мес.	»	
		Отраженная солнечная радиация:				
		глобальная	$\pm 2 \text{ Вт/м}^2$	1 мес.	»	
		зональная	$\pm 10 \text{ Вт/м}^2$	10° широты 1 мес.	»	
		Региональная	$\pm 20 \text{ Вт/м}^2$	1000 км, 1 мес.	Глобальный	
		Радиационный баланс поверхности:				
		глобальный	$\pm 2 \text{ Вт/м}^2$	1 мес.	»	
		зональный	$\pm 10 \text{ Вт/м}^2$	10° широты, 1 мес.	»	
		региональный	$\pm 20 \text{ Вт/м}^2$	1000 км, 1 мес.	»	
		Альbedo поверхности:				
		глобальное	0,005	1 мес.	»	
зональное	0,06	10° широты, 1 мес.	»			
региональное	0,03	1000 км, 1 мес.	»			
		Отраженная солнечная радиация	$\pm 5 \text{ Вт/м}^2$	500 км, 1 мес.	»	
		Уходящее излучение	$\pm 5 \text{ Вт/м}^2$	500 км, 1 мес.	»	
		Альbedo при ясном небе	+0,02	500 км, 1 мес.	»	

1	2	3	4	5	6
	Параметризация обратной связи облачности	Составляющие радиационного баланса поверхности	$\pm 10 \text{ Вт/м}^2$	500 км, 1 мес.	»
	Свойства облаков	Отраженная солнечная радиация и уходящее излучение на длинах волн, соответствующих оптически активным компонентам	1%	5—250 км, 1 мес.	Отдельные регионы
	Корреляция радиационного баланса и других параметров климата	Локальные: высота верхней и нижней границ, толщина, микроструктура, содержание воды, льда, радиационные потоки	С учетом требований к изучению локальных процессов	Локальные, с учетом специфики различных районов	
		Глобальные: Количество	0,05	Глобальные	
		Высота верхней границы	0,5—1 км		
		Толщина	0,5—1 км		
		Радиационный баланс системы	1%		
		Уходящее излучение	$\pm 5 \text{ Вт/м}^2$	250 км, 1 мес.	Глобальный
		Планетарное альbedo	$\pm 1\%$	250 км, 1 мес.	
		Альbedo поверхности	$\pm 3\%$	250 км, 1 мес.	

ратурой и влажностью воздуха). Пока еще плохо понято влияние облачности на поля радиации и температуры (один из наиболее существенных дефектов моделей климата состоит в их неспособности предсказания облачности). Невозможно, например, предвычислить не только величину, но и знак изменений облачности, которые могут произойти при изменениях радиационного баланса, обусловленных увеличением содержания CO_2 .

Важны поэтому специальные эксперименты для обоснования схем параметризации взаимодействия облачности и радиации. Требуется гораздо более обширная информация о свойствах облаков по данным самолетных и спутниковых наблюдений.

Для проверки схем параметризации радиационных процессов необходимо располагать данными спектральных измерений коротковолнового и длинноволнового уходящего излучения. Весьма актуально дальнейшее развитие наземной сети актинометрических наблюдений, накопление данных самолетных измерений по угловому распределению коротковолновой и длинноволновой (к. в.; д. в.) радиации над различными подстилающими поверхностями,

К числу разрабатываемых в настоящее время систем спутниковых наблюдений РБЗ, в частности, принадлежат:

- 1) спутники РБЗ (США);
- 2) солнечно-земная обсерватория и климатологический спутник (СЗОКС) Европейского космического агентства (ЕКА);

- 3) спутник для измерений радиационного баланса атмосферы при помощи космического микроакселерометра (РБАКМ, французское агентство космических исследований),

Программа спутников РБЗ предусматривает использование широкоугольных ($\sim 120^\circ$, от горизонта до горизонта), среднеугольных (10°) и узкоугольных (3°) сканирующих датчиков, что позволит получать данные при пространственном разрешении от 250 км до глобального. Аппаратуру РБЗ планируется устанавливать одновременно на двух солнечно-синхронных спутниках «Тайрос-N» (высота круговой орбиты 833 км, местное время пересечения экватора 7 ч. 30 м. и 15 ч. 30 м.) и спутнике «Прикладной исследователь» (ПИ) на круговой орбите высотой 600 км при угле наклона 56° . Такая система трех спутников обеспечит глобальный охват и данные, характеризующие суточный ход РБЗ (этой цели служит прежде всего ПИ).

Центр космических исследований Франции планирует на 1983 г. запуск многоканального сканирующего радиометра, аппаратуры РБЗ и (или) радиометров для слежения за параметрами гидрологического цикла. В ФРГ ведется разра-

ботка малого спутника РБЗ, в комплекс аппаратуры которого могут войти пиррадиометр, пиранометр, сканирующий многоканальный радиометр и, возможно, пиргелиометр. Критически важное значение для обеспечения высокоточных измерений РБЗ имеет надежная бортовая калибровка аппаратуры по Солнцу, космосу и черному телу. Предполагается осуществлять международные сравнения спутниковой аппаратуры РБЗ как в наземных условиях, так и на борту ТКК многократного использования. Период 1981—1985 гг. следует рассматривать как испытательный. Полную программу наблюдений РБЗ на основе международного сотрудничества удастся осуществить лишь в 1985—1990 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисенков Е. П. Состояние и современные проблемы энергетики атмосферных процессов.— В сб.: Проблемы современной гидрометеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1977, с. 123—144.
2. Вопросы спутниковой климатологии.—Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 1979, вып. 56, с. 63.
3. Зуев В. Е. Лазер — метеоролог. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 179.
4. Израэль Ю. А. Гидрометеорология и контроль состояния природной среды.—В сб.: Проблемы современной гидрометеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1977, с. 230—254.
5. Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Л., Гидрометеиздат, 1977, с. 399.
6. Кондратьев К. Я. Спутниковая климатология. Л., Гидрометеиздат, 1971, с. 64.
7. Кондратьев К. Я. Спутниковая метеорология (1970—1972 гг.)—Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. М., 1974, т. 2, с. 32—190.
8. Космическая дистанционная индикация малых газовых и аэрозольных компонентов атмосферы. Л., изд. ЛГУ, 1974, с. 108.
9. Кондратьев К. Я. Спутниковая метеорология (1972—1974 г.).—Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. М., 1976, т. 3, с. 35—206.
10. Кондратьев К. Я. Современные изменения климата и определяющие их факторы.—Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. М., 1977, т. 4, с. 202.
11. Кондратьев К. Я. Метеорология планет. Л., изд. ЛГУ, 1977, с. 294.
12. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л., Гидрометеиздат, с. 280.
13. Кондратьев К. Я. Спутниковый мониторинг климата. Обзор ВНИИГМИ—МПД. Обнинск, 1978, с. 52.
14. Кондратьев К. Я. Космическая дистанционная индикация температуры подстилающей поверхности. Информ. центр, Обнинск, 1978, с. 50.
15. Кондратьев К. Я. Ледяной и снежный покров по наблюдениям из космоса. Информ. центр, Обнинск, 1978, с. 37.

16. Марчук Г. И., Курбаткин Г. П. Физические и математические аспекты анализа и прогноза погоды.—«Метеорология и гидрология», 1977, № 11, с. 25—33.

17. Федоров Е. К. Экологический кризис и социальный прогресс. Л., Гидрометеоздат, 1978, с. 176.

18. Физические основы климата и его изменений. Национальная программа СССР ПИГАП — климат — МГК при Президиуме АН СССР, М., 1977, с. 147.

Л. С. МИНИНА

СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ В МЕТЕОРОЛОГИИ

С момента получения спутниковой информации метеорологов больше всего интересовал вопрос—«найдут ли подтверждение основные каноны современной синоптической метеорологии?». Сейчас можно уверенно сказать, что искусственные спутники Земли подтвердили все основные положения фронтологического анализа и барической синоптики. Со спутника хорошо прослеживаются не только антициклоны, циклоны и фронты, но можно также видеть и серии циклонов, при которых фронтальные разделы выходя из системы одного циклона, переходят в систему другого. Таким образом понятие фронта, введенное в метеорологию Яковом Бьеркнесом и Туром Бержероном, а затем развитое в работах норвежской школы и советских ученых, получило свое подтверждение. Наряду с этим спутниковая информация внесла много нового, уточняющего прежние положения, и обнаружила до сих пор не известные атмосферные процессы различных масштабов.

Фотографии распределения облачности, полученные со спутников, обнаружили в первую очередь основную особенность в распределении облачного покрова—исключительно высокую степень его организации, о которой не знали раньше, а также неизвестные особенности строения облачности. Приведем некоторые из них.

— Так, фронтальные облачные системы имеют вид хорошо организованных облачных полос или лент. (Рис. 4). Особенно продолжительны и жизнедеятельные холодные фронты. Облачные полосы их существуют значительно дольше, чем можно было проследить по картам погоды. Теплые фронты существуют более короткое время, они особенно активны лишь в период развития циклона и на начальных этапах его окклюдирования. Позже облачная система теплых фронтов деградирует.

— Обнаружены системы облаков, состоящие из отдельных ячеек и гряд (Рис. 5, 6, 7). Они возникают преимущественно в областях повышенного давления, главным образом над океанами, а летом и над сушей. Системы облаков в виде ячеек характеризуют собой районы, занятые холодным, прогревающимся воздухом.



Рис. 4. Фронтальная облачная полоса с серией развивающихся циклонов в Тихом океане (Южное полушарие). На врезке дан ИК — снимок.

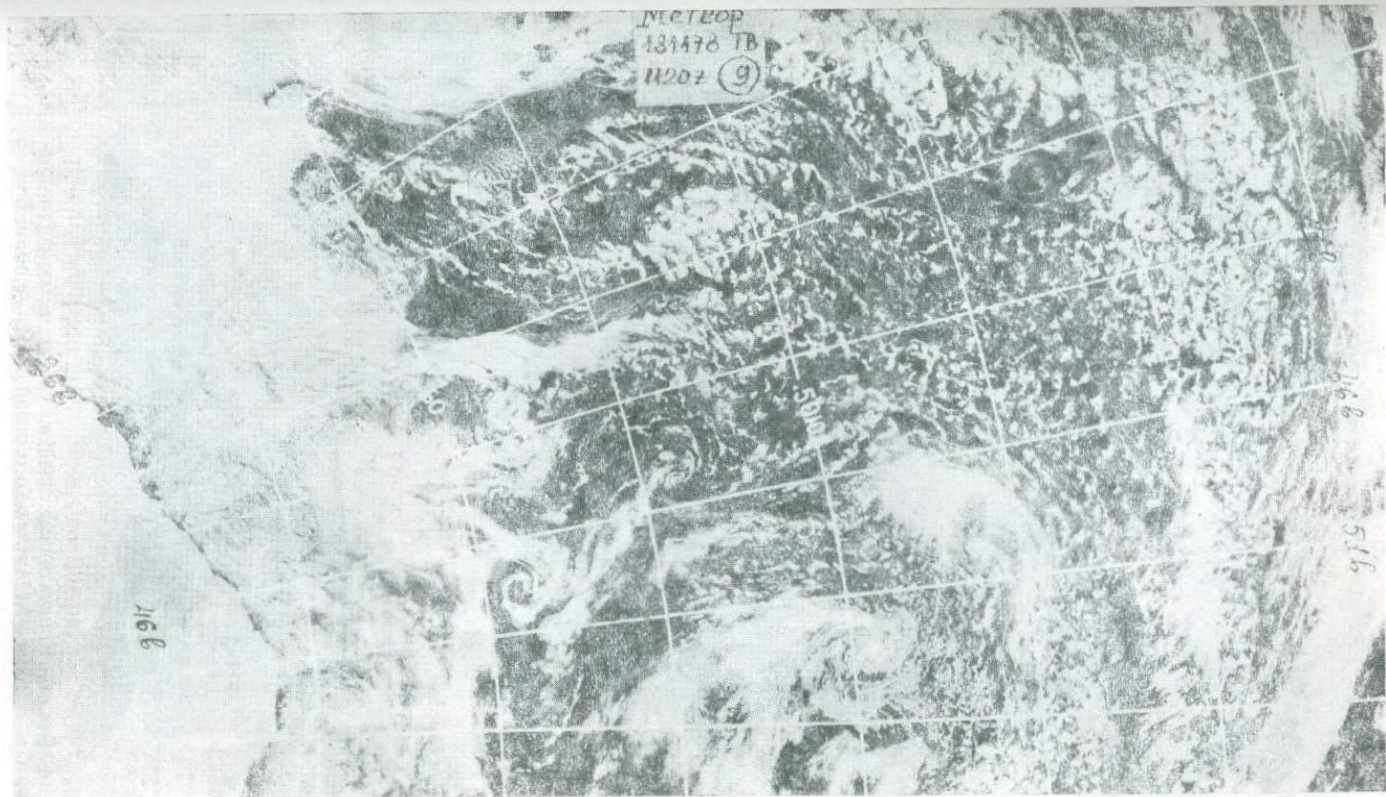


Рис. 5. Конвективные ячейки, ряды и мезовихри в Индийском океане (Южное полушарие). ТВ — снимок.



Рис. 6. Конвективные ячейки, гряды и мезовихри на севере Атлантического океана. ТВ — снимок.

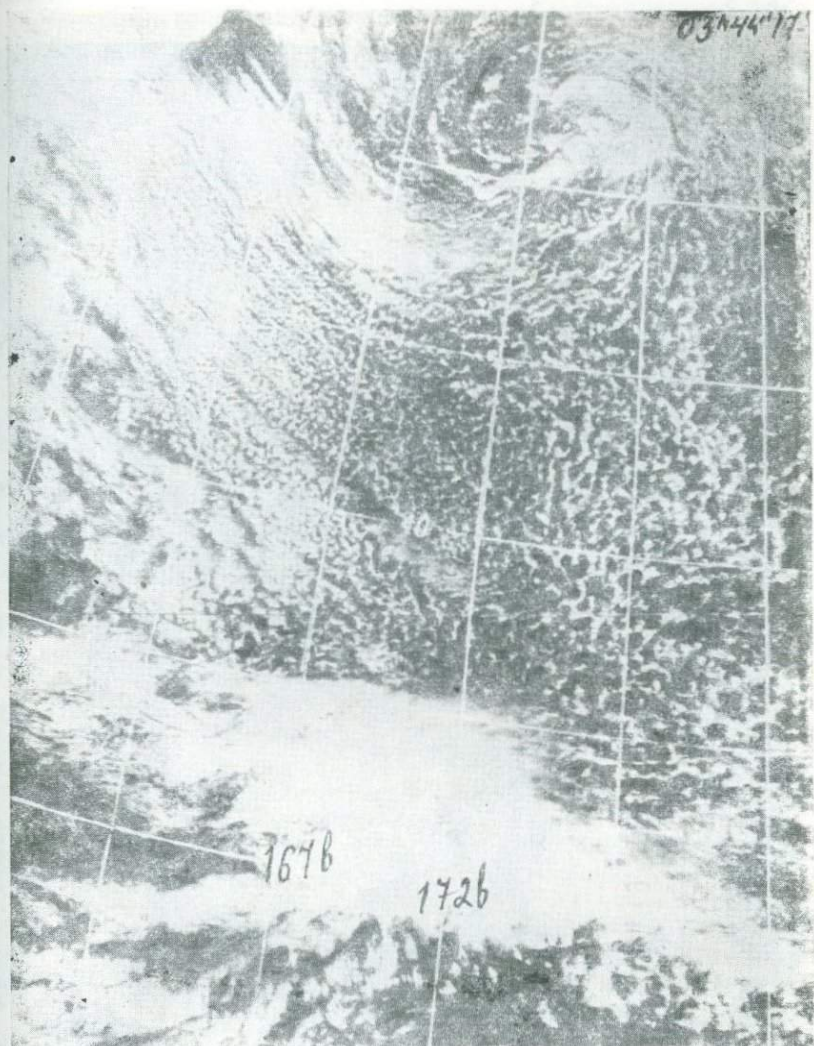


Рис. 7. Конвективные ячейки, гряды и вторичный облачный вихрь в Тихом океане (Северное полушарие). ТВ — снимок.

— Установлено, что циклоны умеренных широт имеют весьма упорядоченное вихревое строение облачности (рис. 8). При этом отдельные довольно мощные спиральные полосы сплошных облаков отходят от центра вихря к его периферии. В промежутках между ними облака отсутствуют или наблю-

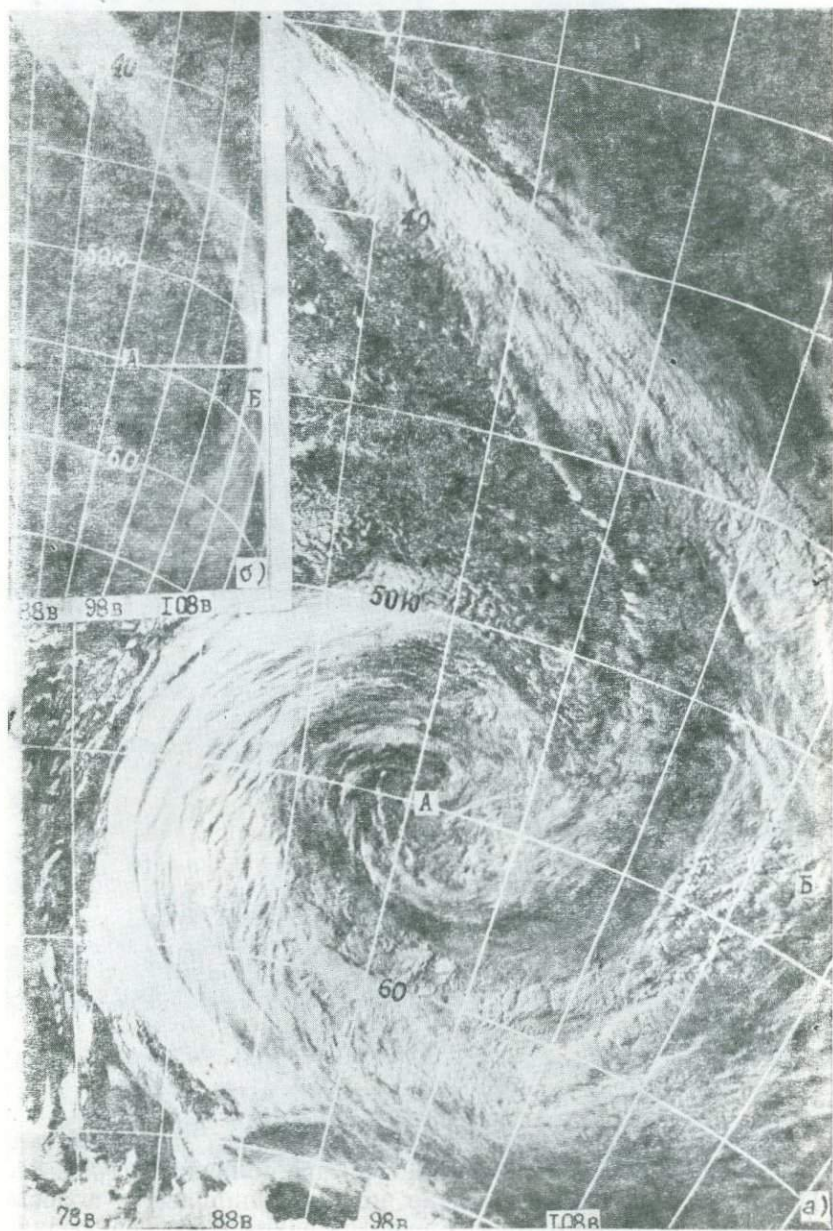


Рис. 8. Система облаков развитого циклона в Индийском океане (Южное полушарие). На врезке дан ИК-снимок.

даются в незначительном количестве. Диаметр вихревых облачных систем может достигать 1000—1500 км, а иногда и более. Степень упорядоченности этих облачных вихрей характеризует различные ступени развития циклонов. Характерно, что в центральной области развития умеренных широт иногда наблюдается сравнительно малое количество облаков.

— Наблюдалось, что тропические циклоны — ураганы и тайфуны — имеют хорошо обособленный округлой формы облачный массив. Он состоит из облачной спирали, туго навитой вокруг центра циркуляции, т. е. вокруг центра циклона. Степень упорядоченности облачного массива и его размер характеризуют стадию развития тропического циклона, т. е. урагана, тайфуна и величину скорости ветра в его области.

— Прослежены облачные скопления, расположенные по широте и соответствующие внутритропической зоне конвергенции, т. е. зоне встреч ветров северного и южного полушарий.

Глобальные снимки облачности позволили увидеть, что перечисленные облачные системы приурочены к той или другой определенной широтной зоне нашей планеты. Поскольку структурные особенности облаков определяются развивающимися в атмосфере процессами, возникла возможность определять по фотографиям облаков, т. е. посредством нефанализа, те синоптические условия, при которых они возникали. Поэтому метод спутникового нефанализа оказался исключительно плодотворным. Структура облачного покрова и многие другие его характеристики таят в себе очень обширную и потенциально богатую содержанием информацию. Эта информация уже оказала большое влияние на развитие наших представлений о циркуляции атмосферы, о планетарном распределении облачного покрова и его основных структурных формах.

Только по фотографиям облаков удалось обнаружить многие атмосферные процессы мезамасштаба, разгадать которые по наблюдениям с Земли не представлялось возможным. Так, например, оказалось, что когда циклона уже нет, еще сохраняется вихревая структура облачности, характерная для циклона. Этот «облачный след» циклона, существующий в течение некоторого времени (около суток или более), значительно ухудшает погоду там, где он наблюдается, и представляет большую опасность для авиации.

Обнаружены небольшого размера облачные вихри, расположенные на высоте в тыловой части обширных циклонов. Эти облачные мезовихри, названные позже вторичными, по праву могут быть отнесены к особым атмосферным про-

цессам. В тылу циклона, там, где они находятся, наблюдаются наиболее благоприятные условия погоды. Мезовихри возбуждают волнообразование на холодном фронте, а затем и развитие циклона. С ними, как оказалось, связана зона максимального волнения океана. Найдена связь ячеистой структуры облачности с ветровым волнением океана и многие другие явления.

Благодаря генетической особенности структурных форм облаков удалось посредством спутникового нефанализа зримо уточнить схему общей циркуляции атмосферы. Спутниковые данные откорректировали отдельные детали циркуляции, в некоторых случаях подсказали новое решение. В большей степени это относится к низким широтам. Поэтому остановимся подробнее на явлениях, обнаруженных метеорологическими спутниками Земли в тропиках.

Из-за отсутствия систематических наблюдений в огромной зоне тропиков, занимающей почти половину земного шара, атмосферные процессы изучались недостаточно глубоко. Тем не менее изучение этих процессов чрезвычайно важно, так как существует определенная взаимосвязь их с процессами умеренных широт. Этими причинами было вызвано проведение советского национального эксперимента ТРОПЭКС-72, а затем международного Атлантического тропического эксперимента (АТЭП).

Благодаря спутниковому нефанализу удалось уточнить и выявить следующие характерные явления планетарной циркуляции атмосферы:

— обмен воздушными массами между полушариями в нижних слоях оказывается слабее, а в верхней тропосфере воздушные течения переходят через экватор гораздо чаще, чем предполагалось;

— обмен воздушными массами между низкими и высокими широтами является более интенсивным и более глубоким. Облачные полосы холодных фронтов, смещающихся из умеренных и высоких широт, прослеживаются до $8-5^\circ$ северной и соответственно южной широты и даже до экватора;

— механизм подъема в верхние слои тепла и влаги в тропиках осуществляется посредством конвективных ячеек, в которых развиваются мощные восходящие движения;

— внутритропическая зона конвергенции воздушных потоков северного и южного полушарий оказалась наиболее устойчивой в течение года на востоке Тихого океана, вместе с тем в Атлантическом океане она мигрирует от $2-3^\circ$ с. ш. зимой и до $7-8^\circ$ с. ш. летом;

— над Индийским океаном вблизи экватора летом обнаружена периодически возникающая зона внутритропической конвергенции; это позволяет заключить, что индийский мус-

сон в отдельные периоды формируется не в южном, а непосредственно в северном полушарии;

— распределение облачных скоплений в зоне внутритропической конвергенции позволило обнаружить в ее области наличие волновых процессов с длиной волны порядка 2000 км;

— тропические циклоны Атлантики, как оказалось, могут развиваться из небольших депрессий (областей пониженного давления), смещающихся с центральных районов Африки; переходя на водную поверхность, они усиливаются и превращаются в ураганы.

Спутниковая информация в настоящее время имеет большое значение в деле прогнозирования погоды. Основным исходным материалом для прогнозирования служат карты погоды. Они составлены по данным сети метеорологических и аэрологических станций. Анализ карт погоды — определение центров барических образований, фронтов, зон облачности и осадков — проводится путем интерполяции полученных данных. Ввиду дискретности наземных наблюдений в прогнозировании могут быть допущены ошибки. Появившийся новый вид наблюдений — космические фотографии — дает непрерывное в плоскости изображение того же циклона и фронта рисунком его облачного поля. Однако при этом нужно знать, какая погода наблюдается у поверхности Земли. Пока такие связи не установлены и для того, чтобы их установить, метеорологам нужно будет провести многочисленные исследования — найти соответствие между всеми структурами облачного поля, открытыми спутниками и свойственной каждой из них погодой у Земли.

Когда же эта задача будет решена, синоптики смогут базироваться в основном на информации спутников. В настоящее время спутниковая информация является главным образом дополнительным видом наблюдений. Однако над океанами, пустынями и приполярными районами это почти единственная возможность наблюдения за погодой.

В Гидрометцентре СССР данные спутников используются с 1961 г. За это время накопился некоторый опыт по применению данных спутников к анализу карт погоды. Облачная информация МСЗ широко используется в оперативной работе других подразделений Гидрометслужбы. С ее помощью уточняется анализ атмосферных процессов над освещенной территорией и восстанавливается над слабо или вовсе неосвещенной территорией, обнаруживаются такие чрезвычайные явления погоды, как тропические циклоны, даются ориентировочные прогнозы погоды при обслуживании трансконтинентальных перелетов и рекомендованных курсов кораблей.

Благодаря информации спутников, метеорологи по структуре облачных полей определяют стадию развития циклона, распознают теплые и холодные воздушные массы и их состояние, определяют ветер в нижней половине тропосферы и ряд других особенностей погоды. С помощью метеорологических спутников Земли можно обнаружить места зарождения тропических циклонов — ураганов и тайфунов и проследить их путь до того, когда они станут отмечаться наземными наблюдениями.

Особенно ценны сведения об облачности, получаемые посредством спутников, для метеорологического обеспечения полетов воздушного транспорта. Обычная метеорологическая информация по своему объему и точности отстала от потребности авиации. Поэтому спутниковые данные существенно улучшили метеорологическую информацию экипажа, способствовали повышению качества прогноза и обеспечению безопасности полетов.

Спутники помогают проводить по океанам тысячи судов. Если прежде над акваторией океанов не было метеорологических наблюдений, то теперь благодаря спутникам имеются сведения о погоде и над этой частью нашей планеты. Информация спутников позволяет посылать предупреждения на борт корабля о необходимости смены курса плавания.

В Гидрометцентре СССР для обслуживания морских судов введены специальные «рекомендованные курсы». Прежде суда шли по раз и навсегда закрепленным курсам. Этот путь из-за плохой погоды не всегда оказывался удачным, а порой был и гибельным. Сейчас суда идут по курсам, рекомендованным синоптиками, по тем маршрутам, где погода наиболее благоприятна. Это обстоятельство позволяет нашим судам проходить через просторы океанов быстро и благополучно, с экономией около 5% ходового времени и около 2—3 млн. рублей в год.

Впервые тщательно исследованы облачные системы и состояние льда в полярных областях и не только в условиях полярного дня, но и в условиях полярной ночи. Спутники помогли выявить различные особенности облачных систем полярных районов, а также рельеф ледовых полей, их состояние и границы.

Спутники приносят очень важную для научных и практических целей информацию о залегании снега в горных районах нашей планеты. Благодаря такой информации могут быть уточнены границы залегания снегов в труднодоступных и горных районах. Этот факт имеет большое значение для определения водного режима многих рек нашей планеты.

Использование в оперативной работе фотомонтажей теле-

визионных и инфракрасных снимков повлекло за собой увеличение общей оправдываемости краткосрочных прогнозов погоды, однако она все еще остается на уровне 86—90%. Неудачные прогнозы падают на так называемые сложные ситуации, характеризующиеся резкой сменой погоды, и на ситуации, определяемые тем или иным мезопроцессом. Периоды резкой смены погоды еще не подвластные в полной мере разуму человека, не могут помочь здесь и спутниковые данные. Мезопроцессы улавливаются спутниковыми наблюдениями, однако для их определения нужна большая детализация, чем это дают современные спутники, освещая Землю 2 раза в сутки.

Наблюдения, осуществляемые с помощью спутников, совершенствуются непрерывно и очень быстрыми темпами. Наряду с техническим усовершенствованием самих метеорологических спутников, создаются новые метеорологические датчики и аппаратура, автоматизируются средства приема, обработки и распространения информации, полученной со спутника. Системы метеорологических спутников в ближайшие годы смогут давать четыре раза в сутки полный обзор погоды над земным шаром. В системе спутников для сбора глобальной информации целесообразно сочетание спутников, вращающихся на разных высотах. Это обеспечит получение детальной информации о средне- и мелкомасштабных процессах, а с другой стороны, позволит наблюдать картину общей циркуляции атмосферы сразу почти на полусфере Земли. Запуск спутников на геосинхронные орбиты дает возможность получать непрерывную информацию о состоянии облачности и подстилающей поверхности.

Значительно будут раздвинуты спектральные интервалы, в которых производится съем информации об облачности и различных радиационных потоках. Уже сейчас широко используются миллиметровый и сантиметровый диапазоны электромагнитного спектра. Они позволяют измерять содержание водяного пара и капельно-жидкой воды в атмосфере над океанами (что дает сведения о вертикальной мощности облаков и интенсивности осадков), а также измерять температуру морской поверхности при любой погоде, границы и сплоченность ледяного покрова и степень волнения океана.

Можно предположить, что оперативные метеорологические спутники будут оборудованы цветными фотокамерами как более информативными.

Все более расширяются возможности спутников как космических метеорологических станций. Успехи наших советских космонавтов, плодотворно работающих в космосе почти по полгода, вселяют уверенность, что недалеко то время,

когда на искусственных спутниках Земли будут находиться и метеорологи-наблюдатели.

Даже сейчас, спустя почти четверть века со дня запуска первого искусственного спутника Земли, трудно предугадать все те виды наблюдений, которые смогут в дальнейшем выполнять спутники. Однако для метеорологов важнее сбора информации открывшаяся большая возможность исследования циркуляции атмосферы с совершенно новых позиций. Спутники позволили создать новое направление — спутниковую климатологию. Перспективы ее развития очень велики, так как спутниковая информация объективна и глобальна. Применение современных ЭВМ позволяет производить сложную обработку спутниковых снимков. Уже сейчас возможно получать избирательную информацию, например, карты с распределением только облаков большой мощности и осадков или карты только снежного покрова, ледяного покрова и т. д.

Разрабатываются приемы использования спутникового нефанализа для оценки средних месячных сумм осадков, вероятности их выпадения и интенсивности. В перспективе намечается возможность использовать спутниковую информацию в долгосрочных прогнозах погоды. Как известно, прогноз на месяц основан на подборе аналогичных атмосферных процессов, по которым затем определяется ход погоды. Зная состояние облачного покрова за нужный промежуток времени для аналогичной ситуации, расчет прогноза погоды можно будет прозвести много точнее.

Применение спутниковых данных об облачности для численных методов прогноза находится в стадии разработки, но и здесь следует ожидать существенного повышения успешности прогнозов.

Е. А. ВОСТОКОВА, Ю. Г. КЕЛЬНЕР

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ИХ ОХРАНЫ ПО КОСМИЧЕСКИМ ФОТОСНИМКАМ

Системное картографическое изучение окружающей среды, направленное на рациональное использование и охрану природных ресурсов, представляет собой новый этап комплексного картографирования [1, 7]. Актуальность системного подхода к картографированию определяется как требованиями народного хозяйства, так и новыми возможностями картографического метода, которые вытекают из использования космических фотоматериалов. Отечественные и зарубежные исследователи уже доказали исключительно важное значение космической информации для развития картографии [1, 2, 3, 4, 5]. С развитием космической техники задачи тематической картографии в деле информационного обеспечения народного хозяйства и науки значительно усложняются. Картографический метод становится одним из важнейших средств представления данных дистанционного зондирования в целях их практического использования. Более 60% потребителей предпочитают использовать космическую информацию в ее наиболее завершенном и пространственно определенном виде — в виде карт.

Возможности использования космических фотоматериалов для создания тематических карт определяются рядом факторов:

— наличием космической фотоинформации высокого качества, обеспечивающей получение путем дешифрирования достаточно надежных данных для разработки тематического содержания карт;

— накоплением значительных объемов материалов космической фотосъемки, обеспечивающих возможность создания карт, по существу, в любой территориальной компоновке (на крупные физико-географические регионы и отдельные территориально-производственные комплексы);

— наличием достаточного традиционного наземного обоснования в виде богатого картографического и литературного фонда.

Таким образом, в настоящее время возможно ставить вопрос о планомерном использовании космической фотоинформации в тематическом картографировании.

Специфические свойства космической информации как источника картосоставления обеспечивают выполнение основных требований к системному картографированию:

— многоаспектность интерпретации данных позволяет выполнить многостороннее и целенаправленное картографирование природных комплексов;

— единая фотокартографическая основа, используемая для тематического дешифрирования, облегчает согласование характеристик и их единообразную локализацию в картографическом изображении;

— одновременность исходной информации по всем видам и направлениям картографирования — принципиально новое свойство, чрезвычайно важное с позиций системного картографирования, которым, как правило, не обладают традиционные методы составления тематических карт;

— сокращение сроков сбора тематической информации, что рационализирует цикл подготовки картографических документов за счет уменьшения объема трудозатрат, свойственных традиционной технологии;

— возможность повторной регистрации состояния природных комплексов через нужные промежутки времени позволяет выявить важнейшие тенденции в развитии природных комплексов и производственных систем, что способствует надежности прогнозирования.

Использование космической фотоинформации для картографического обеспечения охраны среды базируется на основных положениях научного природопользования. В настоящее время вопросы охраны окружающей среды рассматриваются в тесном комплексе с изучением современного состояния и существующих систем потребления природных ресурсов. Равным образом природоохранное картографирование выступает в качестве одной из сторон комплексной картографической инвентаризации и планирования рационального использования природных ресурсов (земельных, водных, растительных и т. д.). Естественно, что при этом природа как объект изучения рассматривается с антропоцентристских позиций, т. е. с точки зрения оптимизации условий жизни людей как в настоящем, так и в будущем. В связи с этим проблема картографического обеспечения охраны окружающей среды является частью более широкой и общей пробле-

мы картографического изучения природы в целях оптимального и рационального использования ее ресурсов.

Эти положения явились отправными для разработки основных принципов системного природоохранного картографирования с использованием материалов космической фотосъемки.

Системность картографирования подразумевает анализ геокомплексов как систем различной степени сложности и взаимосвязанности, т. е. собственно географический аспект, и моделирование их в системе тематических карт.

Реализация этих принципов в изучении геокомплексов с использованием космических фотоматериалов для целей охраны и рационального использования природных ресурсов осуществляется в процессе создания серий карт различного масштаба и территориального охвата, обеспечивающих различные направления:

— разработку единой системы картографической документации, создаваемой с использованием космических фотоснимков и отвечающей природным особенностям геосистем и перспективам их хозяйственного освоения и развития. При этом должны учитываться картографические источники, уже накопленные в ходе предыдущих исследований традиционными методами;

— определение рациональной системы показателей картографирования взаимообусловленных явлений, обеспечивающих комплексное изучение геосистем в их современном состоянии с учетом первоочередных хозяйственных задач использования природных ресурсов;

— разработку нормативной документации, образующей систему методик и технологий, регламентирующих практическое осуществление космического картографирования для целей информационного обеспечения мероприятий по охране окружающей среды.

Принцип серийности выражается в составлении различных тематических карт, образующих определенное взаимосвязанные серии, которые можно рассматривать как целостную систему тематических карт, предназначенных для информационного обеспечения мероприятий по охране среды. Эта система включает:

— серию карт, отражающих природный (экологический) потенциал изучаемой территории;

— серию карт современного состояния природных ресурсов, отражающих характер их использования;

— серию карт динамики и прогноза антропогенного воздействия на окружающую среду;

— серию природоохранных карт, т. е. карт рекомендуемых природоохранных мероприятий, направленных на раци-

ональное использование природной среды и ее защиту от повреждений.

Карты экологического потенциала должны отражать объективно существующие природные закономерности, дающие основание для наиболее полного освоения природных ресурсов. Это карты геологические, ландшафтные, потенциальной или восстановленной растительности и т. д. Это карты долговременного пользования, основное назначение которых состоит в том, что они дают возможность сравнивать существующее положение изучаемой территории с потенциально возможным. Такой анализ позволяет выяснить необходимость проведения тех или иных мероприятий по охране среды, оценить рациональность современного использования природных ресурсов.

Для природоохранных целей основной картой является ландшафтная, построенная по морфоструктурному принципу. Она наиболее полно отражает существующие внутри- и межландшафтные взаимосвязи и дает наиболее широкое представление о природных ресурсах.

Серия карт современного состояния природных ресурсов представляет собой собственно инвентаризационные карты, которые констатируют существующее использование природных ресурсов с оценкой их состояния и антропогенного изменения. Эта серия представляет собой особый вид оперативных карт, требующих для своего составления ускоренных методов. Поэтому материалы космической фотосъемки зачастую являются основным источником оперативного составления.

В качестве основной в этой серии дается карта использования земель с оценкой и характеристикой современного состояния природных ландшафтов, включая антропогенную нарушенность и размещение возможных источников загрязнения среды. В отдельных случаях могут включаться частные (покомпонентные) карты современного состояния и использования тех или иных особо важных (для изучаемой территории) природных ресурсов, например, лесохозяйственные с характеристикой современного состояния лесов; сельскохозяйственные, мелиоративные и другие, также карты с оценкой современного состояния и использования имеющихся ресурсов.

Анализ рассматриваемых карт позволяет оценить изменения природного потенциала территории, обусловленные деятельностью человека, установить тенденции дальнейших изменений среды при сохранении того же характера воздействия. На основе такого анализа может быть составлен прогноз дальнейших возможных изменений окружающей среды. Прогноз может быть представлен в текстовой и таб-

личной форме, но более наглядно отражение его в виде особых оперативных карт динамики природных и антропогенных процессов и прогноза возможных изменений окружающей среды.

Карты оценки антропогенного воздействия и прогноза возможных изменений среды, т. е. карты динамики природных и антропогенных процессов, также носят оперативный характер. Поэтому для их составления тоже целесообразно с максимальной полнотой использовать космическую фотосъемку. Наличие разновременной космической фотосъемки позволяет достоверно и быстро, особенно с привлечением оптико-электронной аппаратуры или ЭВМ для обработки материалов, получить наиболее объективную информацию о влиянии хозяйственной деятельности человека на природу. Последнее позволяет более точно строить карты динамики процессов и делать прогноз о возможных изменениях природной среды при проведении тех или иных природоохранных мероприятий или при изменении характера использования природных ресурсов.

Прогнозные построения необходимы для выбора оптимального варианта природоохранных мероприятий и вида рационального использования природных ресурсов, включая восстановление возобновляемых ресурсов, охрану среды от загрязнения и нежелательных необратимых изменений¹.

Система тематических карт завершается серией карт охраны и рационального использования природных ресурсов. Эти карты также имеют оперативный характер, но в то же время являются результатом анализа всех карт предыдущих серий. В серию карт охраны природы и рационального использования природных ресурсов входят комплексная (синтетическая) карта рекомендуемых природоохранных мероприятий, рационального использования природных ресурсов и частные природоохранные карты.

На комплексной карте отражаются главные направления охраны среды и рационального природопользования, размещение и характер проводимых и требуемых природоохранных мероприятий для ландшафта в целом, для всех геосистем в их взаимосвязях и взаимовлиянии. При этом обязательен показ необходимых мероприятий для восстановления нарушенных участков или участков с неправильно эксплуатируемыми природными ресурсами; участков, требующих рекультивации или защитных мероприятий от возможного загрязнения среды. Разработана схема содержания такой карты.

¹ При составлении прогнозных карт необходимы данные о проведенных и запланированных мероприятиях по охране и рациональному использованию природных ресурсов для конкретно изучаемой территории.

Участки, требующие:

абсолютной охраны		регулирования использования эксплуатируемых природных ресурсов		рекультивации нарушенных территорий		защитных мероприятий от загрязнения
уникальных ландшафтов	отдельных компонентов	при экстенсивном использовании	при интенсивном использовании	частичной	полной	—
для мало и слабо измененных				для сильно и необратимо измененных		

На частных картах охраны и рационального использования определенного компонента геосистемы показываются размещение и характер конкретных мероприятий по охране и использованию только изучаемого компонента, например растительного покрова (или уже — лесов), почвенного покрова, подземных или поверхностных вод; или определенных комплексов, например болотных систем, песчаных массивов и т. д. При составлении таких карт необходимо учитывать вопросы охраны других природных компонентов и среды в целом, т. е. мероприятия по охране отдельного компонента или природно-территориального комплекса, предлагаемые на покомпонентных картах, должны вписываться в общую систему мероприятий по охране и рациональному использованию других компонентов или ландшафта в целом, предлагаемым на комплексной карте рекомендуемых мероприятий.

Для картографического обеспечения мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов на основе космической фотоинформации, как минимум, необходимо составление:

- ландшафтной карты (на морфоструктурной основе);
- комплексной карты использования земель с характеристикой их современного состояния;
- карты антропогенных ландшафтов (или оценки антропогенного воздействия);
- комплексной карты охраны природы и рационального использования земель, (т. е. карты рекомендуемых мероприятий по охране и рациональному использованию земель), основанной на оценке происшедших и прогноза возможных антропогенных изменений геосистем.

Состав карт, направленных для обеспечения мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов и составляемых по космическим фотоматериалам, может быть проиллюстрирован следующей схемой, где приведено соотношение карт этих серий, выполненных при разработке методики использования космических фотоснимков для природоохранного картографирования в юго-западных Кызылкумах.

Роль и значение космической фотоинформации при составлении карт природоохранной тематики различно для разных серий. Наиболее широко эта информация применима при составлении карт природного потенциала и особенно оперативных карт современного состояния природных ресурсов и антропогенного воздействия на геосистемы. Карты охраны природы и рационального использования природных ресурсов (т. е. карты рекомендуемых мероприятий) являются картами—выводами и составляются на основании анали-

Серия	К а р т ы	
	комплексные	частые
Природного (экологического) потенциала	Ландшафтная	Потенциальной растительности (геоботаническая); четвертичных отложений
Современного состояния природных ресурсов	Использования земель	Современного растительного покрова; типов песков и степни их закрепленности; грунтовых вод
Оценки антропогенного воздействия	Антропогенных ландшафтов	Антропогенной нарушенности растительности; антропогенной измененности гидрогеологических условий
Природоохранная	Комплексная карта рекомендуемых природоохранных мероприятий	

за карт предыдущих серий, выполненных по материалам космических фотосъемок и необходимых дополнительных данных.

Составляемые по космическим фотоматериалам карты не подменяют и не дублируют накопленный картографический фонд, они дополняют его новыми данными, обеспечивая системное изучение природных комплексов. Эти карты нового типа можно назвать «космофототематическими». Новизна космофототематических карт определяется специфическими требованиями системного картографирования, к которым в первую очередь относятся:

- преимущественное отображение качественных и количественных характеристик, получаемых в результате интерпретации космических изображений;
- отбор показателей картографирования, определение содержания и степень согласованности карт;
- максимально более полное отображение современного состояния природных ресурсов, направлений и интенсивности их антропогенного видоизменения;
- соответствие состава карт и их содержания решению

первоочередных задач хозяйственного развития, стоящих перед каждым из конкретных регионов;

— значительная степень генерализации содержания, ограничение его требований создания тематической основы для целей общей системной характеристики природных комплексов и для практического использования специалистами разных направлений для решения многообразных отраслевых задач путем целенаправленной детализации содержания;

— введение фотоизображения местности в содержание основы тематических карт, что обеспечивает их документальность и облегчает практическое использование специалистами разного профиля.

Принцип взаимосвязанности при системном картографировании для обеспечения мероприятий по охране и рациональному использованию диктуется не только системным подходом к этому процессу, но и самими материалами космических фотосъемок, которые представляют собой интегрированное изображение земной поверхности со всеми ее деталями и особенностями. На снимках находит отражение внешняя, фотофизиономичная характеристика природно-территориальных комплексов, полная интерпретация которых возможна только на основании знаний о внутри- и межландшафтных взаимосвязях. В связи с этим при дешифрировании космических фотоснимков наиболее применимым является ландшафтный (ландшафтно-индикационный) метод, с помощью которого возможно изучение и картографирование не только фотофизиономичных компонентов среды, но и тех, которые не имеют на снимках прямого отражения в фототоне и рисунке изображения. Дешифрирование таких «деципиентных» компонентов проводится на основе использования индикационных связей между ними и фотофизиономичными индикаторами. Следует отметить, что фотофизиономичность компонентов ландшафта является переменной и определяется как естественными причинами, так и условиями и масштабом съемки. В связи с этим компоненты, фотофизиономичные на одних снимках, на других, имеющих меньшее разрешение на местности, могут иметь интегрированное фотоизображение.

Объективные особенности материалов космической фотосъемки — охват значительной территории одним кадром, оптическая генерализация изображения природных объектов — определяют некоторую специфику ландшафтно-индикационного дешифрирования и составления тематических космофотокарт. Так, при составлении ландшафтной карты, выделение картографируемых единиц идет «сверху вниз», т. е. от общего к частному, поэтому первоначально выделяются наиболее общие закономерности и наиболее крупные

единицы таксономического ранга. Это соответствует в известной степени типологическому районированию территории. Затем внутри выделенных однородных участков проводится выделение природно-территориальных комплексов более низкого таксономического ранга, в чем выражается также системный подход к картографированию. Аналогичная система предложена также и ландшафтоведами МГУ [5].

Использование космической фотоинформации в геоботаническом, почвенном и других видах тематического картографирования, осуществляемого на основе ландшафтно-индикационного дешифрирования космических фотоснимков, также накладывает определенный отпечаток на составляемые карты. Как правило, при почвенно-геоботаническом картографировании классификация современного почвенного и растительного покрова проводится по эколого-топологическому принципу с широким показом их структуры.

Принцип взаимосвязанности составляемых карт серий, направленных на обеспечение природоохранных мероприятий, выражается также в том, что для составления всех карт серий используется единая основа, обеспечивающая согласование составляемых карт, как по содержанию, так и по рисовке основных контуров. Согласование требует установление рациональной последовательности составления карт, начиная от основных карт природного потенциала до завершающей карты рекомендуемых мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов.

Последовательность составления карт на основе космических фотоматериалов включает первоначальное ландшафтное дешифрирование и составление предварительной ландшафтной карты или карты интерпретированных природных контуров. Предварительная ландшафтная карта служит основой для составления покомпонентных карт природного потенциала, а затем и карт современного состояния природных ресурсов.

Построение ландшафтной карты осуществляется на морфоструктурной основе, т. е. с учетом структурно-тектонического строения территории и его отражения в рельефе и всех выявленных предыдущими исследованиями внутриландшафтных взаимосвязей.

В то же время космические фотоснимки, обладающие значительной обзорностью, служат важным материалом для изучения пространственных межландшафтных связей между отдельными морфологическими элементами ландшафта или между соседними ландшафтами, т. е. между геосистемами различного уровня. Изучение таких межландшафтных взаимосвязей и взаимозависимостей раскрывает широкие перс-

пективы для изучения динамики природных компонентов, например, динамики геохимических и грунтовых потоков.

Использование космической фотоинформации позволяет наиболее четко реализовать целесообразно последовательность составления серий карт всей системы природоохранного и тематического картографирования. Только соблюдение определений последовательности при комплексном подходе к составлению серий возможна правильная достоверная оценка антропогенных изменений окружающей среды, что в свою очередь обеспечивает точность прогноза возможных изменений окружающей среды при определенных экономических предпосылках.

Последовательность составления карт приведенных выше серий обеспечивает в дальнейшем их согласованность и взаимозавязанность, что, в свою очередь, значительно облегчает процесс редактирования и составления издательских оригиналов карт.

Реализация серийности определяется тем, что рассмотрение и картографирование геосистем различных уровней возможно на основании космической фотоинформации, выполненной с различной степенью увеличения. В связи с этим возможна разработка системы картографической документации на различные регионы страны на основе специального районирования территории, поскольку природная и хозяйственная специфика каждого из регионов определяет как состав карт, так и особенности их содержания. Карты, входящие в состав серий, можно разделить на две основные группы:

- базовые, включаемые в каждую серию на все регионы;
- регионально-специализированные, отражающие специфику и потребности определенного региона и включаемые в серию при необходимости.

Рассмотрение природных закономерностей на разных геосистемных уровнях обеспечивается наличием разномасштабной космической фотоинформации, начиная от мелко-масштабных обзорных космических фотоматериалов и кончая снимками, увеличенными до средних масштабов. Первые используются при проведении районирования или тематического картографирования больших регионов или страны в целом. Так, на основе обзорной фотосхемы составлена обзорная космофототектоническая схема Арало-Каспийского региона [3]. Второй уровень — использование более крупномасштабных фотосхем для картографирования геосистем на уровне ландшафтов или урочищ и даже фаций. Примером могут служить карты, составленные при разработке методики картографирования по космическим фотоматериалам на отдельные регионы Советского Союза [1, 6].

Реализация системного картографирования как отдельных регионов, так и особенно страны в целом, возможна только на основе широкого межведомственного сотрудничества. В соответствии с принципиальной организационной схемой работа распадается на ряд основных этапов, выполнение которых осуществляется ГУГКом или отраслевыми специалистами.

Получение космической фотоинформации, ее первичная фотографическая, фотограмметрическая, оптико-электронная и машинная обработка, а также создание на ее основе картографических основ (фотопланов, фотокарт) являются задачами ГУГК. Тематическое дешифрирование и создание исходных оригиналов карт является прерогативой отраслевых научных организаций и отраслевых специалистов.

Окончательная редакционная обработка серий исходных оригиналов, редакционно-составительские, подготовительные и издательские работы осуществляются на картографических фабриках ГУГК.

Составление тематических карт по космическим фотоснимкам для обеспечения тематических мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов на основе системного подхода осуществляется по определенным этапам или периодам, почти независимо от вида карты, ее места в сериях, назначения и масштаба. Эти работы включают 5 основных этапов (периодов):

— подготовительный;

— период предварительного дешифрирования и составления макетов карт;

— этап контрольной проверки схем дешифрирования (макетов карт) и доизучения наземными методами (если не достает наземного обоснования схем дешифрирования);

— составление исходных (авторских) оригиналов карт;

— согласование и редактирование карт.

Дальнейшие работы, связанные с созданием издательского оригинала карт, красочной пробы и издания карт проводятся картосоставительскими организациями [5].

Полный цикл работ необходим, главным образом, при составлении серий карт природного потенциала и современного состояния природных ресурсов, которые требуют наиболее полного и последовательного использования космических фотоматериалов.

Для оперативного составления карт оценки антропогенного воздействия, карт динамики и прогноза природных и антропогенных процессов используются уже составленные карты первых двух серий. Анализ и сопоставление этих карт, с одной стороны, дешифрирование разновременной космической фотоинформации, с другой, позволяют подойти

к изготовлению этих карт при составлении исходных (авторских) оригиналов карт первых двух серий. В этот же период, после создания аналитических карт и выполнения ряда дополнительных операций, выполнены результирующие карты природоохранной серии — комплексная и частные карты рекомендуемых мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов. Четкая организация таких работ может обеспечить составление карт за минимальный срок.

Однажды выполненные карты природного потенциала могут в дальнейшем обновляться примерно через 10—15 лет. Карты оперативные, к которым относятся все остальные серии, обеспечивающие мероприятия по охране и рациональному использованию природных ресурсов, должны периодически пересоставляться, очевидно, через 3—5 лет (в связи с пятилетним циклом планирования, принятого в стране).

При периодическом пересоставлении таких тематических карт с использованием материалов космической фотосъемки большое значение имеет автоматизированное считывание по повторным материалам космических съемок происшедших за исследуемый промежуток времени изменений в состоянии использования земель и природных ресурсов.

Дальнейший экспрессивный анализ может дать быстрые и достоверные данные для сопоставления карт оценки и дальнейшего прогноза возможных антропогенных изменений окружающей среды. Таким образом, может быть осуществлен геосистемный мониторинг окружающей среды, направленный на оптимизацию природопользования, на наиболее полное использование и воспроизводство возобновляемых природных ресурсов в интересах народного хозяйства.

Первые эксперименты и опытно-производственные работы по составлению серий тематических карт, направленных на картографическое обеспечение мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов, проведены Госцентром «Природа» совместно с научными и производственными организациями отраслевых министерств и ведомств, институтами Академии Наук СССР и союзных республик на отдельные районы Средней Азии, Нечерноземного центра и Белоруссии, Прибайкалья и Забайкалья.

Проведенные эксперименты способствовали разработке методики составления карт этих серий и подтвердили возможности значительного сокращения сроков создания карт при использовании средств космического зондирования, особенно ошутимое при системном картографировании удаленных и труднодоступных регионов. При этом составляемые карты характеризуются большой детальностью рисовки кон-

туров и объективностью выделяемых границ и природных рубежей.

Развертывание работ по системному картографированию природных ресурсов, их современного состояния, охраны и рационального использования по материалам космических фотосъемок, выполняемые совместными усилиями картографов, географов и отраслевых специалистов, является важной государственной задачей, так как создает надежную основу для планирования рационального использования природных богатств страны и их охраны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Береговой Г. Т., Киенко Ю. П. О комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов на основе космической информации.—«Геодезия и картография», 1977, № 11, с. 12—15.
2. Кельнер Ю. Г., Востокова Е. А.—Картографирование природных ресурсов, охраны природы и окружающей среды (анализ докладов на VIII МКК).—«Геодезия и картография», 1978, № 1, с. 54—59.
3. Космофототектоническая карта Арало-Каспийского региона. М-б 1:2 500 000. М., ГУГК, 1978, 1 л.
4. Кравцова В. И. Космическое картографирование. М., изд-во МГУ, 1977, с. 168;
5. Применение дистанционных методов при создании тематических карт. М., изд. МФГО, 1978, с. 110.
6. Природные ресурсы СССР. К-42-Г. Ташкент. М., ГУКГ, 1976, с. 56.
7. Системное картографирование природных и социально-экономических комплексов. Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по тематическому картографированию. М., изд-во МГУ, 1978, с. 185.

А. А. ГРИГОРЬЕВ

ГОРОДА И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Космический мониторинг взаимодействия городов и окружающей среды — новое интенсивно развивающееся направление научных исследований. В настоящей работе предпринята попытка подвести некоторые итоги состояния проблемы и наметить перспективы исследований. В основу работы были положены исследования автора: статьи по отдельным аспектам проблемы [1, 2, 3, 6], а также результаты анализа отечественных [5, 7—9, 11] и зарубежных источников (среди последних приведены только основные).

Роль дистанционных космических съемок в изучении городов

В настоящее время процесс урбанизации приобрел субглобальный характер. Судя по данным различных исследователей, этот процесс неостановим и в обозримом будущем будет охватывать все новые и новые районы Земли.

По прогнозам американских специалистов в 2000 г. около половины населения США (150 млн. человек) будет жить в трех крупнейших мегалополисах: Бостон-Вашингтон, Питсбург—Чикаго и Сан-Франциско—Сан-Диего. В Европе к этому времени возникнет «дельтаполис» в треугольнике с вершинами в Брюсселе, Кельне и Амстердаме с 45 млн. жителей. В Южной Азии возникнет гигантская агломерация Большая Калькутта с населением 30—50 млн. человек.

Помимо возникновения новых агломераций, может образоваться крупная урбанизованная зона между Москвой, Владимиром и Горьким, и другая, которая будет охватывать весь Донбасс, где уже сейчас Донецк сближается с Макеевкой [3].

Совершенно очевидно, что с прогрессированием развития процесса урбанизации усилятся и, возможно, усложнятся

процессы взаимодействия городов и окружающей среды. С ростом городов возрастет их нагрузка на природу и одновременно станет более ощутимым «давление» природы на города. Сохранится опасность дальнейшей деградации природы — основы жизни на Земле. В этих условиях особенно возрастет роль контроля за проявлениями взаимодействия в системе город—окружающая среда, увеличится необходимость в получении всесторонней информации о функционировании этой системы. Особое значение приобретает установление пределов роста больших городов и организация контроля за их экспансией на окружающую среду, выявление границ экологического или, как называют некоторые исследователи (Моисеев Н. Н.), гомеостатического равновесия между городом и окружающей средой.

Проводимые в указанных целях наземные наблюдения, как правило, локальны, повсеместно их организовать весьма затруднительно. Особенно это касается динамических явлений, быстро изменяющихся в пространстве и во времени, например загрязнений атмосферы. Получаемая только на основе наземных наблюдений информация о воздействии городов на окружающую среду, как правило, весьма скудна. Это данные о «нагрузках» на природу в отдельных точках. Они не дают полного представления о взаимодействии города и среды. Вместе с тем и изготовляемые в настоящее время отдельные виды карт «нагрузки» человека на природу, ее изменения вокруг городов, в частности, карта землепользования, составляемая на основе наземной и частично самолетной информации, быстро устаревают.

Специфические изменения в экологии городов в современный период настоятельно требуют нового подхода к их изучению. Наряду с изучением локальных контактов города и окружающего ландшафта необходимы региональные и даже глобальные исследования урбанизации и ее экологических последствий. Без организации подобных исследований локальные наблюдения будет все труднее и труднее увязывать, столь же затруднительно будет выявление крупных закономерностей процесса рассматриваемого взаимодействия.

Вместе с тем, помимо большого охвата по площади, наблюдения за городами должны производиться с достаточной регулярностью, что весьма сложно организовать обычными методами. Наконец, изучение взаимодействия городов и окружающей среды на современной и последующих фазах его развития требует комплексного подхода при исследованиях, одновременного изучения многих явлений природы.

Все указанное выше наиболее оптимально может быть выполнено в результате организации постоянного дистанци-

онного мониторинга городов: космического — для наблюдений за крупными регионами и глобальных наблюдений и самолетного — для наблюдений за отдельными участками. Только при налаживании такого контроля может быть получена наиболее полная информация о том, где, как и в каком направлении происходят те или иные региональные изменения в окружающей среде. В противном случае вокруг агломераций городов незаметно и быстро могут произойти столь глубокие нежелательные изменения природной среды, что их будет слишком трудно исправить при жизни одного поколения. Таково, например, почти полное исчезновение лесов (вследствие вырубок) между Вашингтоном и Бостоном. Масштабность этого процесса в полной мере была оценена американскими градостроителями только после получения космической информации.

Данные, получаемые на основе космических и самолетных наблюдений, могли бы собираться в специальном хранилище, своего рода «банке» данных, где будут объединяться с разного рода наземной информацией и прежде всего географического и экономического характера (количество населения, расположение заводов и т. д.). Только таким образом можно будет своевременно и оперативно выявить географические районы или элементы ландшафта, наиболее нарушаемые воздействием городов.

Информация, получаемая с помощью космических съемок, может быть использована не только в оперативных целях. Она также важна для выявления особенностей фактического роста агломераций, изменения в структуре землепользования, тенденции поглощения в процессе роста одних городов другими и т. д. Представляется, что только на основе материалов космических съемок и, возможно, в наиболее оптимальной форме планирование развития городов (в том числе и долгосрочное) — стимулирование одних и ограничение других, нежелательных тенденций их роста. Например ограничение сосредоточения в одном конце агломерации или урбанизированного района промышленных предприятий, дальнейшая концентрация которых может вызвать опасные загрязнения атмосферы и т. д. (рис. 9).

Космические съемки, как показывают данные разных специалистов [1—5], важнейший источник информации о городе, его окружении и взаимодействии с окружающим ландшафтом и, наконец, обратном влиянии ландшафта, природной среды на город. Во многих случаях эта информация не может быть получена никакими другими путями, в других случаях она значительно дополняет данные, полученные другими методами. Объем информации о городах и окружающих ландшафтах, получаемых космической съемкой, велик

и с совершенствованием космических систем непрерывно растет. Вместе с тем космические съемки не являются и не будут являться единственным источником данных по рассматриваемой проблеме. В то же время космические съемки могут заменить некоторую существующую технику сбора данных, поскольку они дают значительные преимущества во времени, пространственном охвате, гибкости получения данных.



Рис. 9. Карта-схема распространения смога, образовавшегося над промышленными центрами Северной и Центральной Европы по данным съемки с метеорологического спутника ЭССА-8 5 августа 1970 г. в 10 часов 46 минут по Гринвичу. Показаны города — центры городских агломераций с населением свыше 1 млн. человек, оказавшиеся в зоне развития смога (по:32).

Использование материалов космических съемок само по себе, конечно, не позволит всесторонне решить все задачи, связанные с проблемой «город и окружающая среда». Однако они будут весьма полезны при использовании их в рамках единой информационной системы о городах [33], цель которой — получение всесторонней информации о городах, переработка и использование ее для решения разнообразных городских нужд, как современных, так и будущих, городского планирования. Источниками входной информации о городах будут как обычные данные, полученные наземными исследованиями, так и сведения, получаемые съемкой с аэро- и космических платформ. Объединение отдельных си-

стем наблюдения за городом — наземных, самолетных и космических в единую систему сбора данных и слежения за функционированием и развитием городов позволит наиболее эффективно решать многие вопросы проблемы «город и окружающая среда».

Именно на основе развития систем дистанционного слежения за городами станет возможным в ближайшем будущем создание урбанистической экологии, где город будет рассматриваться как комплексная система взаимосвязанных и взаимодействующих элементов с входами и выходами энергии и материи [13].

Некоторые итоги космического мониторинга взаимодействия городов и окружающей среды

Дистанционный мониторинг взаимодействий городов и окружающей среды включает: обнаружение особенностей проявления этих взаимодействий; выявление их пространственных и временных изменений; их картирование. Он может послужить для предсказания (прогноза) проявления этих взаимодействий и базой для сбора данных, используемых для предупреждения нежелательных взаимодействий при планировании городов.

Хотя до настоящего времени специальный систематический мониторинг городов и их окружения еще не организован, имеющиеся данные отдельных экспериментальных съемок городов, а также данные анализа разнотипных «случайных» изображений позволяют сделать некоторые заключения.

Наблюдениями Земли из космоса однозначно установлено, что городские агломерации и окружающие зоны их сильного воздействия на окружающую среду (урбанизированные районы) дифференцируются среди прочих образований как отчетливо выраженные районы, отличающиеся от смежных с ними природных комплексов по ряду физических характеристик, связанных с их отражательными и излучательными свойствами. Важно отметить, что космическими исследованиями выявлено объективное существование таких районов, которые в интегрированном виде отражают результаты самых различных следов воздействия городов на окружающую среду. Среди специфических физических аномалий укажем следующие:

1. Многие городские агломерации представляют собой районы Земли, характеризующиеся относительно повышенными, по сравнению с зональными значениями, температурами поверхности (излучательными свойствами).

Города, по мере их роста, превращаются в своеобразные аномально нагретые «тепловые острова». Температурные контрасты таких «островов» с окружающим фоном, как установлено по данным инфракрасной тепловой съемки со спутников, могут достигать нескольких градусов. Такие температурные градиенты зафиксированы были, в частности, наблюдениями из космоса Филадельфии, Балтимора, Вашингтона, Нью-Йорка и окружающего их фона (с радиационными температурами соответственно 6—8° и 2—5° С) [28].

Пространственные размеры «островов тепла» определяются целым комплексом факторов — не только площадью города или урбанизированной территории, но и особенностями структуры города — развитием в его пределах зеленых насаждений и водных объектов, плотностью застройки, количеством различного рода промышленных выбросов в атмосферу и в акватории, наконец, метеорологическими условиями. Площади тепловых «островов» составляют: для Большого Берлина, Большого Лондона и Большого Парижа — 800 км², Гамбурга — до 900 км², урбанизированного района Антверпена — Брюсселя — 1200—1400 км².

2. Городские агломерации представляют собой районы, выделяющиеся значениями альбеда (более повышенным или более пониженным) по сравнению со смежными с ними зональными географическими образованиями. Особенно большие контрасты альбеда зональных природных и зональных образований, каковыми являются урбанизированные территории, наблюдаются для городов, расположенных в лесной зоне.

Изменение альбеда в пределах города на урбанизированной территории связано, с одной стороны с уничтожением естественного почвенного и растительного покрова, то есть зональных элементов ландшафта, и с другой стороны, — со строительством разного рода искусственных сооружений, характеризующихся специфическими спектральными особенностями. Вариации альбеда, выражающиеся в оттенках тона или цвета на космических изображениях, позволяют определить «физические» границы города или урбанизированной зоны. Распространение такого «реального» города, фиксируемого по данным космической съемки, сплошь и рядом не соответствует распространению города в административных границах, а также данным, собираемым другими методами исследований.

3. Города и их агломерации являются районами Земли интенсивного светового излучения (в ночное время суток). Световые пятна, соответствующие вариациям в освещении тех или иных городов, отражают их распределение, тенден-

дии роста и формирование новых агломераций. Наиболее крупные световые пятна на Земле приурочены к агломерациям городов и их скоплениям. В СССР они коррелируют с агломерациями центральной и южной Украины, Московской агломерацией [1]. Крупнейшее световое пятно на Земле соответствует мегаполису, расположенному на атлантическом побережье Северной Америки.

Как показали исследования специалистов Гарвардского университета [16], отмечается значительное сходство световых рисунков и рисунков компьютерно составленной карты распространения населения, в частности, на территории США.

Яркость свечения городов коррелирует с освещенностью того или иного центра и, следовательно, косвенным образом отражает их энергетический потенциал. Тем самым открываются новые дополнительные возможности путем сравнения освещенности различных городов, по данным съемки из космоса, в определении потребностей в энергии (программа такого эксперимента разрабатывается в США [12]).

4. К акваториям, окружающим агломерации городов, приурочены тепловые аномалии, достигающие региональных масштабов, связанные с тепловым воздействием на акватории сточных вод от городов (рис. 10). Примером может служить полоса аномально нагретых вод, расположенная вдоль южного побережья Балтийского моря, где сконцент-

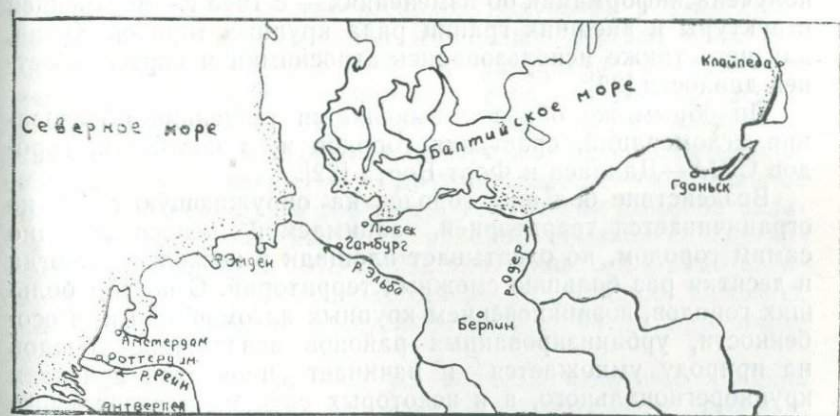


Рис. 10. Карта-схема аномально нагретых вод в прибрежно-морских районах (вблизи побережий Северного и Балтийского морей), источником которых послужили сточные воды городов (промышленные и бытовые стоки), расположенных на побережье и на реках, впадающих в эти моря. Составлена в результате анализа теплового инфракрасного снимка, полученного в интервале 3.4—4.1 мкм 19 июня 1970 г. с метеорологического спутника Нимбус-3 (по:28).

рированы десятки крупных городов разных стран [23]. По данным тепловой инфракрасной съемки из космоса, в июне 1970 г. тепловая аномалия была зафиксирована почти без перерывов на протяжении около 1500 км от Гента до Клайпеды, при средней ширине 40—60 км. Наиболее нагретые воды наблюдались у берегов Голландии (с температурным градиентом 3—4 К). У побережий большинства других стран поверхностные воды были нагреты в меньшей степени; температурный градиент в этих случаях составлял 2—3 К. Наименьший нагрев вблизи побережья в пределах рассматриваемой полосы аномально нагретых вод был зафиксирован у берегов СССР, в районе Клайпеды (с температурным градиентом 2 К). Следует также отметить, что наиболее крупные разрывы в указанной полосе наблюдались в пределах территориальных вод СССР и ГДР.

Космические наблюдения убедительно показали интенсивное развитие урбанизации на Земле, и, главное, с их помощью получена наиболее объективная картина реального развития урбанизации в тех или иных районах мира. Это связано прежде всего с вышеотмеченным свойством космических изображений фиксировать город в его «физических», а не административных границах. Сравнение же космических изображений и карт или же последовательных космических снимков дает возможность выявлять изменение границ города, его рост. Таким образом, в частности, была получена информация об изменениях — с 1945 г. — внутренней структуры и внешних границ ряда крупных городов Китая, для чего также использовались аэроснимки и карты 30-летней давности [32].

Подобным же образом выявляется тенденция образования агломераций, срастания городов и, в частности, городов США — Далласа и Форт-Ворта [22].

Воздействие больших городов на окружающую среду не ограничивается территорией, занимаемой непосредственно самим городом, но охватывает площади в несколько, иногда в десятки раз большие смежных территорий. С ростом больших городов, возникновением крупных агломераций и, в особенности, урбанизированных районов воздействие городов на природу умножается и начинает проявлять признаки крупнорегионального, а в некоторых случаях и глобального явления.

Наблюдениями с Земли выявлены многие крупные региональные изменения ландшафтов вокруг городов и среди них — уничтожение естественного растительного покрова, в особенности древесного, на десятки, и даже сотни километров, выпадение загрязнений из атмосферы на поверхность Земли в радиусе нескольких десятков километров, быстрое

отчуждение сельскохозяйственных земель под земли городского землепользования вследствие усиливающегося наступления города на смежные территории, усиленная нагрузка на окружающий ландшафт вокруг городов в результате интенсивного развития всякого рода коммуникаций, сходящихся к городам [1, 21, 34].

Наиболее интенсивно развиваются исследования по применению космических изображений для изучения землепользования в городах и вокруг них [14, 15, 19, 25, 30]. Особенно эффективно для этих целей использовались калиброванные многоспектральные изображения со спутников типа ЛЭНДСАТ: элементы землепользования выделялись на них по спектральным признакам в результате машинной обработки снимков. Таким образом были составлены карты землепользования для ряда городов и районов городского подчинения, на которых выделялось до 11 категорий земель и в том числе карты в масштабе 1 : 100 000 на Вашингтон и его окрестности [20].

Особенно важный аспект космического мониторинга городов связан с новыми возможностями слежения за макромасштабными загрязнениями природной среды городами. Космическими съемками выявлены ареалы мощных дымовых загрязнений атмосферы от городов, получены ранее неизвестные данные о региональных перемещениях дымовых облаков — на сотни и даже на тысячи километров от источников. Один из таких регионов приурочен к зоне скопления многих городов — промышленных центров Северной Европы и прежде всего ФРГ. Образование дымовых облаков в этом районе способствуют, с одной стороны, нередко возникающие специфические метеоусловия: сочетание влажного морского воздуха, развитие инверсий, слабые приповерхностные ветры и, с другой стороны — интенсивное загрязнение атмосферы городами. Гигантское дымовое облако, зафиксированное над этим районом съемкой со спутника ЭССА-8 5 августа 1970 г. [27], протягивалось в виде полосы от Южной Англии через северную Францию, Бельгию, Голландию и ФРГ на расстояние свыше 700 км при ширине не менее 200 км.

По снимкам из космоса установлены некоторые районы макрораспространения загрязнений акваторий от городов, например р. Потомак, ниже Вашингтона получены данные об их более широкой миграции (на десятки и сотни километров), чем это было ранее известно (например, для южной части Балтийского моря).

Полученная информация заставляет пересмотреть ранее существовавшее представление о доле загрязнения атмосферы и акваторий Земли городами. Как выяснилось по на-

блюдениям из космоса, это явление имеет региональный, а иногда и субглобальный характер. Размеры зон загрязнений (с учетом их перемещений) делают их реально опасными не только для локальных районов вблизи источников загрязнения, но и для крупных агломераций в целом, протянувшихся на многие десятки и даже сотни километров, а также для других территориально разбросанных с источниками агломераций.

Примером могут служить вышеотмеченные дымовые загрязнения атмосферы над Северной Европой и загрязнение акватории в южной части Балтийского моря. Хотя источниками этих загрязнений природной среды были отдельные промышленные центры или агломерации городов, они имели не локальное, а региональное распространение, пересекали государственные границы и затрагивали интересы целого ряда государств.

Новы и весьма перспективны исследования по выявлению макромасштабных осадений вокруг городов атмосферных загрязнений промышленного происхождения. Зоны их выпадения обнаруживаются на снимках с заснеженным изображением ландшафта [6]. В настоящее время по снимкам из космоса изучается только один из аспектов возможных последствий этого явления — интенсификация таяния снежного покрова. Установлено, в частности, что в разных географических зонах величина опережения сроков таяния снега вокруг городов над зональными сроками, то есть вне области влияния этих городов, различна [8].

Съемками из космоса также установлено, что с ростом городов воздействие на них разнообразных природных явлений (идет ли речь о наводнениях, извержениях вулканов, лесных и болотных пожарах и т. д.) не ослабляется, а, напротив, ощущается городами во все больших размерах.

Города, в особенности большие, представляют собой своеобразные ядра антропогенных нарушений природы. Отличительные особенности их как центров макровоздействия на окружающую среду, выявляемые космическими наблюдениями, состоят в следующем. Города и прежде всего большие города и их окружение, это «горячие» точки нашей планеты, где процессы взаимодействия природы и человека наиболее активны. Они являются своеобразным фокусом, где в природе преломляются самые разнообразные результаты активности человека, следов воздействия на гидро-, био-, лито- и атмосферу. Сплошь и рядом вследствие чрезмерных нагрузок на природу экологическое состояние городов и окружающих смежных территорий находится на критическом уровне, переход через который может вызвать необратимые изменения природной среды.

Указанная новая космическая информация о городах и зонах их воздействия, о весьма различных проявлениях взаимодействия города и природы, о больших размерах отмеченных явлений заставляет подходить к агломерациям городов как мощному источнику воздействия человека на окружающую среду. Тем самым космическими исследованиями выявляются новые специфические черты такого феномена, каким является город.

Возможные направления использования данных космических съемок в целях градостроительства

Области применения материалов космической съемки Земли для целей градостроительства чрезвычайно многообразны. Правда, в связи с молодостью развития этого научного направления, круг исследований еще не достаточно велик, однако он неустанно расширяется.

Основываясь на опыте практических исследований в СССР и за рубежом, а также теоретических предположениях, укажем основные возможные области применения космических съемок в градостроительных целях.

I. Изучение собственно города:

Исследование структур городов.

Изучение рисунков изображений городов, их типизация.

Выявление изменений внутригородского землепользования.

Изучение движения транспорта, его динамики.

Определение границ (физических, а не административных) города.

Изучение тенденции и динамики роста городов.

Обнаружение и изучение древних поселений и городов.

Проведение ускоренной оценки плотности населения и определение районов проживания.

II. Изучение воздействия городов на окружающую среду:

Выявление загрязнения акваторий.

Исследование загрязнения атмосферы.

Обнаружение и изучение воздействия загрязнения атмосферы на ландшафт.

Выявление воздействия загрязнения акваторий на ландшафт.

Изучение и планирование землепользования вокруг городов.

Исследование развития дорожной сети вокруг городов. Их рисунков.

Тепловое воздействие городов на окружающую среду.

Исследование образования мегалополисов, городских агломераций.

Следующие две крупные группы возможных областей применения космических съемок укажем без детализации:

III. Изучение влияния окружающей среды на города (контроль за распространением снежного, ледового покрова, таянием ледников в горах, наводнениями, вулканическими извержениями и т. д.).

IV. Изучение окружающего ландшафта для развития старых и строительства новых городов (инженерно-геологическая оценка местности, составление карт залесенности, заболоченности, обводнения, расчленения местности и т. д.), а также с точки зрения рекреационных целей.

Некоторые проблемы развития дистанционных методов изучения городов и окружающей среды

Для дистанционного изучения городов и окружающей среды необходимы весьма разнообразные многоспектральные изображения, полученные в разное время (года, сезона, суток), разной детальности и обзорности. Изучение закономерностей дистанционных изображений рассматриваемых объектов — важнейшая задача, стоящая перед исследователем.

Разработка методов дистанционного изучения городов и их окружения требует постановки специальных комплексных исследований на тестовых участках — полигонах, в качестве которых должны быть выбраны некоторые «типичные» города, расположенные в разных физико-географических условиях. На этих полигонах должны быть организованы систематические наземные наблюдения за различными элементами строения городов и их окружения с целью их последующего использования при анализе данных дистанционных съемок. Составной частью исследования должны быть и экспериментальные совмещенные спутниковые и подспутниковые (самолетные и наземные) наблюдения (съемки), проводимые на тестовых участках с целью апробирования различных датчиков, выявления оптимальных условий съемки, особенностей геометрической и оптической генерализации изображений изучаемых объектов на снимках.

Исследования на городах-полигонах уже проводятся в частности, с целью изучения воздействия больших городов на климат. В СССР, начиная с 1972 г., осуществляются комплексные наземные и самолетные исследования метеорологического и радиационного режимов городской атмосферы, особенностей ее загрязнения в Запорожье, Алма-Ате, Тбилиси [4]. Специальный эксперимент по выявлению возможностей мелкомасштабной самолетной спутниковой съемки для целей городского землепользования проводился в 1970 г.

в США, где в качестве опытных полигонов были выбраны 26 городов [26]. Позднее такие эксперименты осуществлялись в районах Бостона и Нью-Хейвена [29].

Не менее важной проблемой является разработка эталонных дешифровочных признаков элементов строения города и его окружения, в том числе создания атласов разнотипных эталонных дистанционных изображений рассматриваемых объектов, полученных в разные сезоны года, в разных спектральных интервалах и т. д.—«банка» их спектральных и геометрических признаков с целью оценки изменений городов и окружающей их среды. Само собой разумеется, что развитие методов телеиндикации городов и окружающей среды невозможно без создания автоматизированных систем получения, хранения и обработки (анализа) дистанционной аэрокосмической информации.

Прогноз изменений природной среды, вызываемых большим городом, а, следовательно, и планирование его развития трудно осуществимы без исследований по моделированию природных и антропогенных процессов в урбанизированной зоне. В качестве одного из основных источников информации при проведении такого рода моделирования должна быть использована спутниковая информация. Подобные исследования—ландшафтное моделирование—были реализованы, в частности, для области г. Денвер (США). В результате компьютерной обработки различных видов информации, в том числе и спутниковой, о строении ландшафта области на основе их математического анализа с помощью теории цепей Маркова были получены данные о тенденциях развития землепользования вплоть до 1982 г. [31].

К одной из главных проблем развития дистанционных методов изучения городов и окружающей среды относится проблема информационного содержания данных аэрокосмической дистанционной индикации их параметров. Каким образом должна осуществляться дистанционная съемка городов и их окружения, в каком масштабе, с каким разрешением (детальностью), в каких спектральных интервалах, с какой периодичностью и т. д.? На все эти вопросы в настоящее время нет однозначного ответа. Хотя из проведенных исследований, очевидно, например, что в общем виде для распространения снежного покрова вокруг городов могут быть полезны ТВ снимки с разрешением около 1 км с метеорологических ИСЗ. Для изучения макроособенностей «физических» границ крупных городов—космические снимки с разрешением в несколько десятков метров, а для выявления особенностей внутренней структуры городов—космические снимки еще более высокого разрешения и аэроснимки. В основу разработки корректных требований к съемке го-

рода и их окружения должны быть положены статистические оценки их геометрических и спектральных свойств, их изменчивости в пространстве и во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А. А. Космическая индикация антропогенных изменений окружающей среды.— В сб.: Аэрокосмические исследования Земли. М., «Наука», 1979.
2. Григорьев А. А., Кондратьев К. Я. Природные ресурсы и охрана окружающей среды.— В сб.: Успехи СССР в освоении космического пространства. Второе космическое десятилетие. М., «Наука», 1978.
3. Григорьев А. А., Липатов В. Б. Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. Л., Гидрометеониздат, 1978.
4. Зарецкий В. И. Градостроительство и охрана окружающей среды. Киев, «Будівельник», 1975.
5. Кондратьев К. Я. Комплексный энергетический эксперимент: некоторые результаты и перспективы.— Бюлл. ВМО (Всемирной Метеорологической Организации), 1976. т. 25, № 4.
6. Кондратьев К. Я., Григорьев А. А., Покровский А. Г. и др. Космическая дистанционная индикация малых газовых и аэрозольной компонент атмосферы. Л., изд. ЛГУ, 1974.
7. Кравцова В. И. Космическое картографирование. М., изд. МГУ, 1977.
8. Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации. Л., Гидрометеониздат, 1977.
9. Рэй Д. Р. Тематические карты городских районов США, составленные по данным дистанционных съемок. — 8-я Международная картографическая конференция, секция 3. М., 1976.
10. Томсон Д. Использование городских земель в США: новые источники данных.— В сб.: Международная география, 1976, т. 7. География населения. М., 1976.
11. Рябчиков А. М., Сайко Т. А. Изучение антропогенного воздействия на природную среду.— В сб.: Исследование природной среды космическими средствами, т. 4, М., ВИНТИ, 1975.
12. Brandtl H. W. The night eye in the sky. — Photogramm. Engng., v. 44, n. 4.
13. Alexander R. H. a. o. Remote sensing of urban environment. — Proceed. of the Symp. on Remote sensing of environment. Ann. Arbor, 1968, p. 889—911.
14. Alexander R. H. a. o. Land use and environmental assessment in the central Atlantic region. — Preprint presented at NASA earth resources survey symp. Houston, 1975, 29 p.
15. Anderson J. R. (Ed.). Land use and land cover maps and statistics from remotely sensed data.— Remote sensing of electromagnetic spectrum, 1977, v. 4, n. 4. 194 p.
16. Bodechtel J., Gierloff-Emden H. G. Weltraumbilder die dritte Entdeckung der Erde. Paul List Verlag K. G. München, 1974. 208 s.
17. Brücker A. u. a. Europa aus dem All. Deutsche Verlags-Anstalt Georg Westermann Verlag. Stuttgart, 1974. 160 s.
18. Brücker A. u. a. Die Erde aus dem All. Deutsche Verlags-Anstalt Georg Westermann Verlag. Stuttgart, 1976. 160 s.
19. ERTS: a new window on our planet. Ed. by R. S. Williams and D. Carter. Washington 1976. 362 p.

20. Gaydos L. and Wray J. R. Land cover map from LANDSAT, 1973 with place names. Washington urban area. Publ. U. S. Geol. Surv., Washington, 1978.
21. Holz R. K. Cultural features imaged and observed from Skylab 4.— Skylab explores the Earth. Washington, 1975, 225—242 p.
22. Holz R. K. and Boyer R. E. Patterns from Appollo 6 photos.— Photogramm. Engng., 1972, v. 38, n. 1, 274—284 p.
23. Kaminski H. Erfassung der Abwasserzuflüsse und deren Flächenverteilung im Englischen Kanal der Nord und Ostsee durch Bestimmung der Oberflächetemperatur des Meeres mittels Infrarot—Satellitenluftbildern. Bochum, 1972.
24. Lindgren D. Applications of remote sensig to the monitoring of urban growth.—Public data use, 1975, v. 3, n. 3.
25. Lins H. F. Jr. Land use mapping from Skylab S-190 photography.—Photogramm. Engng and Remote Sensing, 1978. v. 42, n. 3 p. 31—39.
26. Manual of Remote Sensing. Publ. by Amer. Soc. of Photogramm. Virginia, 1975.
27. Mohr J. Air pollution photographed by satellite.—Monthly Weather Rev., 1971, v. 99, n. 8.
28. Rao P. K., Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite.—Bull. Amer. Meteor. Soc., 1972, v. 52, n. 7, p. 41—49.
29. Satellites will be urban planning tools.—Eng. News Rec., 1972, n. 20, 27, v. 188.
30. Simpson R. B. a. o. Investigation of land use of Nothern Megalopolis using ERTS-imagery. NASA. Wash. D. C. 1974, p. 37—42.
31. Tom C. a. o. The design of a model to project land uses and predict open spaces encroachment patterns Denver metropolitan area. Final report Colorado St. Univ., Fort Collins, 1974. 195 p.
32. Welch R. and Panell C. W. LANDSAT investigations of recent urban land use changes in Northeastern China.—Proceed. of the 10 Int. Symp. on Remote sensing of environment. Ann Arbor, 1975.
33. Wellar B. S. Remote sensing and urban informations systems.—Photogramm. Engng., 1970, v. 34, n. 6, p. 71—86 p.
34. Wobber F. J. Orbital photos applied to the environment.—Photogramm. Engng., 1970, v. 34, n. 6 p. 852—862.

Е. А. ГАЛКИНА, В. Е. КИРЮШКИН,
В. К. КОНСТАНТИНОВ, В. П. МИРОШНИЧЕНКО

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТ)

Применение аэро- и космических съемок для изучения и охраны природной среды обитания человека — сложная проблема. Ее содержание многообразно, а современное состояние требует существенных научно-исследовательских работ в целом ряде направлений. Природная среда — наиболее сложный объект для полноценного применения и разработки аэро- и космических методов исследования. Если наши представления об отдельных компонентах природной среды, основанные на отраслевых исследованиях, достаточны для практического использования, то представления о природной среде как о целостной индивидуально выраженной системе различных объектов и явлений возникло относительно недавно.

Первое ее определение, развиваемое и в настоящее время, было дано академиком А. А. Григорьевым [12], который выделил специфическое тело — географическую оболочку Земного шара — сферу взаимодействия и взаимопроникновения процессов, происходящих в литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере. Процессы в ней протекают как за счет космических, так и теллурических источников энергии. Только в географической оболочке есть жизнь. За истекшие 30—40 лет достигнуто многое. Выделение географической оболочки как целостной природной системы послужило основой для раскрытия ряда закономерностей формирования природной среды. Возникли такие науки как землеведение, ландшафтоведение.

Природная среда — многофакторное образование с огромным диапазоном прямых и обратных связей, проявляющаяся в единой энергетической непрерывно развивающейся системе. Применение для ее изучения аэро- и космических ме-

тодов показало, что при их использовании имеется возможность одновременно зафиксировать многообразие и многоплановость проявлений этой системы. Именно в них обнаруживается сопряжение разных видов ее исторического развития. Особый интерес представляет изменение физиономичности ее территориальных комплексов, указывающее на непостоянство потока природной информации. Учет этого явления очень важен, так как изменения физиономичности этих проявлений носят закономерный характер (многовековой, многолетний, сезонный, суточный).

Отдельные компоненты географической оболочки не могут рассматриваться изолированно, так как они органически и исторически связаны между собой. Естественный ход изменений в природной среде испытывает, в наш век, очень большое, а нередко и необратимое влияние человеческой деятельности (сведение лесов, интенсивная распашка, выработка торфяников, осушка). Широкое развитие техногенных процессов воздействия человека на окружающую среду и ее изменение приняли огромные масштабы, вскрылось, что целостность природной среды имеет непрерывно-прерывистый характер и что наряду со сложной дифференциацией географической оболочки в ней существуют всепроникающие прямые и обратные связи, выражающие постепенно происходящий в ней обмен веществом и энергией. Интенсивность этого процесса меняется во времени и от места к месту. Он порождает многообразие и многоплановость природной среды и проявляется дискретно.

Эта особенность легла в основу тематического картографирования и районирования природных условий, что в свою очередь привело к выявлению множества природных территориальных комплексов (ПТК)—ландшафтов, объединенных диалектическим единством происхождения и развития. Эти природные территориальные комплексы относятся к географической оболочке в целом, как подсистемы различных, но более мелких рангов. Они соподчинены посредством многоступенчатой иерархии с однотипным чередованием ПТК различных рангов.

Представление о целостности природной среды должно лежать в основе разработки теории и практики дешифрирования аэро- и космических снимков, а также выявления геоиндикационных связей и индикаторов различных природных явлений и процессов в географической оболочке. Все эти свойства надо иметь в виду при разработке и применении дистанционных методов ее изучения, а именно:

- 1) при учете ритмичности изменений в физиономичности ПТК, что важно для выбора времени проведения наблюдений и съемки с воздуха и из космоса, подбора и констру-

ирования технических средств и выбора материалов для получения наиболее информативных данных;

2) знание иерархии ПТК необходимо при системном подходе к изучению и дешифрированию изображений природных объектов. Важно оно и при сборе первичных полевых материалов, необходимых для формализации данных и для моделирования;

3) фиксация непрерывно-прерывистого характера целостности природной среды должна лежать в основе выделения объектов и дешифрирования их границ, фиксирующих эти изменения в пространстве и времени и пр. Особое внимание должно уделяться наземному обоснованию и разработке методики его применения;

4) проблема охраны природы и рационального использования природных ресурсов тесно связана с установлением буферных зон вокруг охраняемых объектов.

В связи с перечислением встает ряд задач:

I. Разработка методики получения оптимальных и достаточно информативных аэро- и космических изображений, пригодных для выявления:

а) целостных ПТК разных рангов и определения основных факторов их формирования и функционирования;

б) ПТК, подвергшихся антропогенному воздействию, и определения основных факторов в нарушении их существования и функционирования;

в) зон взаимодействия естественных и антропогенных факторов, определения направленности процессов и прогнозирования их результатов.

II. Разработка методики выявления геоиндикационных связей в целостных и нарушенных ПТК, выявление их индикаторов и дешифрирование изображений, отражающих действие формирующих их факторов на разных стадиях, от зарождения до деструкции.

III. Разработка методики полевых наблюдений с учетом различных проявлений иерархии ПТК в типически выраженных природных условиях.

IV. Разработка методики проведения повторных многозональных и разномасштабных аэро- и космических съемок в аспекте ритмики ландшафтов — цель дешифрирования динамики природных и антропогенных процессов и выбора оптимального времени проведения — наблюдений, съемок и аппаратуры.

В Лаборатории аэрометодов Министерства геологии СССР, а также в других учреждениях совершенствуются старые и разрабатываются новые технические средства для дистанционных методов исследования. К ним можно отнести

обычное фотографирование на разных пленках, радиолокацию, инфракрасную и спектрофотометрическую съемки, лазерную спектроскопию и ряд других видов съемок. Однако эффективное использование результатов того или иного средства, как и оценка работы аппаратуры и возможностей ее использования, тесно связаны со степенью обоснованности их применения. К сожалению, наши знания о природной среде с точки зрения ее физиономичности нередко отстают от темпов разработки технических средств, а потому проверку работы приборов трудно провести на должном уровне. Часть перечисленных выше положений рассматривается на примере болот.

Аэро- и космические снимки дают большой эффект при их изучении. Болотные массивы — динамическая система, состоящая из растительности, торфа, воды и вмещающего их ложа. В пределах болотных массивов идет непрерывный процесс торфообразования и торфонакопления. Близки к ним по природе и заболоченные земли. Однако в пределах заболоченных земель признак торфонакопления имеет прерывистый характер; одновременно с накоплением растительных остатков происходит и энергичный их распад, поэтому мощность торфяного слоя в этих условиях продолжает оставаться невысокой и не превышает 30 см.

Болотные массивы и, в меньшей степени, заболоченные леса отличаются значительной физиономичностью, отражающей комплекс условий географической среды, влияющей на них с момента зарождения и до наших дней. Внешний облик и внутреннее строение их инвариантных состояний используется для составления динамических моделей. Такие модели на основании анализа аэрофотоснимков составлялись Е. А. Галкиной для болотных массивов Русской равнины и Балтийского кристаллического щита [6, 9]. Повторяемость изображения этих моделей в огромном количестве наблюдается на космических и аэрофотоснимках.

В процессе формирования лика Земли под влиянием тектонических процессов произошло отграничение друг от друга крупных территориальных выделов, отличающихся друг от друга по геоструктуре, формам поверхности, специфике климатических условий и флоре (в основном сухоходольных пространств) и другим признакам.

Именно этими крупными подразделениями и следует пользоваться в первую очередь при изучении аэро- и космических изображений болотных массивов и заболоченных пространств. Для правильного понимания природы болотных массивов в их пределах следует рассматривать все более и более дробные ПТК, пользуясь для этой цели методом средне- и крупномасштабного районирования.

За основу выделения наиболее крупных территориальных выделов взяты подразделения Г. Д. Рихтера [14, 15]. Однако Е. А. Галкиной пришлось учесть такой фактор, как степень распространенности болотных урочищ и их систем, четко видимых на аэрофотоснимках. Ею [5, 7, 9] были выделены следующие крупные ПТК: Балтийский кристаллический щит; Русская равнина; Западно-Сибирская низменность; Средне-Сибирские плоскогорье; Восточно-Сибирское нагорье; Дальний Восток; Урал; Алтай и Саяны. В качестве примера разбираются три страны: Балтийский кристаллический щит, Русская равнина и Западно-Сибирская низменность. Болотную характеристику этих крупных территориальных выделов мы приведем лишь в пределах лесной зоны — территории, на которой процессы болотообразования протекают наиболее интенсивно.

Балтийский кристаллический щит. Рассматриваемая часть Балтийского щита лежит в подзоне темнохвойной тайги, ее северной, средней и южной частях. Рельеф доледниковый и позднепоследледниковый денудационно-тектонического, ледникового (моренного), водноледникового аккумулятивного, озерно-ледникового и озерно-абразионно-аккумулятивного характера; у берегов Белого моря — морской [2]. Для территории характерна большая озерность, озера занимают до 10% поверхности; реки имеют слабо разработанные долины, поймы почти отсутствуют; профиль большинства рек ступенчатый; характерна развитость озерных плесов; химизм вод гидрокарбонатный.

Распределение болотных массивов неравномерное, они имеют небольшие размеры и очень изрезанную береговую линию. Заторфованность территории, в среднем, не превышает 15%. С высоты болотные массивы производят впечатление огромной сети неравномерной густоты. Большей частью они представляют собой слабослитные системы болотных урочищ сложного и очень сложного характера. В настоящее время слагающие их болотные урочища переживают смешанную фазу развития — мезо-олиготрофную, а также олиготрофную. Болотных урочищ, переживающих автотрофно-мезотрофную и евтрофную фазы развития, немного. Эти массивы были описаны А. К. Каяндером [32] и Ю. Д. Цинзерлингом [30]. Они считаются особенно характерными для фенноскандии. Болотные урочища, переживающие смешанную фазу развития, относятся к массивам класса логов и сточных котловин, имеющих периферически-олиготрофный ход развития [4, 6].

Весьма широко распространены болотные урочища класса пологих склонов и подножий склонов. Они приурочены, в основном, к озерно-ледниковым и зандровым равнинам.

Большая часть из них переживает олиготрофную фазу развития и даже ее грядово-мочажинную стадию. В Финляндии такие массивы носят название северо-карельских верховых болот. Болотные массивы класса склонов нередко имеют хорошо развитый древесный ярус из сосны и представляют собой ценный лесомелиоративный фонд; они имеют близкий к центрально-олиготрофному ход развития.

В меньшей мере на территории Балтийского щита развиты болотные урочища речных плесов (переживающие евтрофно-мезотрофную фазу развития) и приозерные, переживающие мезо-олиготрофную и олиготрофную фазы развития. Последние из перечисленных болотных массивов не занимают значительных площадей, но весьма характерны для территории этой страны. На террасах Белого моря, а также на границе Балтийского кристаллического щита и Русской равнины единично встречаются болотные массивы с выпуклой формой поверхности. По внешнему облику они очень походят на болотные массивы класса замкнутых котловин Русской равнины, но резко отличаются от них по строению торфяной залежи.

Для территории Карельской АССР сделан ряд попыток использовать аэроснимки для районирования ее болотных массивов (11, 13), а данные по их аэроназемному исследованию являются ценным материалом в качестве ключевых участков.

Русская равнина. Территория этой страны в климатическом отношении более разнообразна. Таежные темнохвойные леса, как и в первом случае, представлены северо-, средне- и южно-таежными. К ним на значительной части площади примыкает полоса таежно-широколиственных лесов, с резко отличными климатическими и почвенными показателями. Последние сменяются полосой широколиственных. Различен и характер рельефа поверхности.

В пределах рассматриваемой части Русской равнины прослеживается связь между современным рельефом поверхности равнины с особенностями рельефа коренных пород. Схема рельефа коренных пород, приведенная Ю. А. Мещеряковым [23], хорошо объясняет групповое размещение болотных урочищ различных классов и их систем. Она позволяет более беспристрастно оценивать зависимость распространения выпуклых моховиков от рельефа и климата, а использование материалов дистанционных методов исследования — отличить типичные выпуклые грядово-мочажинные массивы замкнутых котловин от сходных с ними эксцентрично-выпуклых грядово-мочажинных моховиков подножий склонов, а тем более от грядово-мочажинных моховиков скло-

нов. Первые имеют типичный центрально-олиготрофный ход развития, а вторые — близкий к нему.

Распределение выпуклых болотных массивов, переживающих олиготрофную фазу развития, по территории таежных лесов неравномерно. Оно в очень большой мере связано с условиями рельефа. Так, наибольшее сосредоточение болотных урочищ крупных систем класса замкнутых котловин наблюдается в северо-западной части полосы. Однако и здесь они нередко замещаются урочищами класса сточных котловин, переживающих олиготрофную фазу развития. Особенно характерно здесь присутствие массивов подножий склонов с эксцентрично выпуклой формой поверхности. Обычны для этой территории также и болотные массивы, переживающие евтрофную и мезотрофную фазы развития; это относится к болотным массивам склонов и сточных котловин. Всегда следует помнить, что «скорость» прохождения болотными массивами фаз и стадий развития связана не только со степенью трофности географической среды, но и с условиями дренирования их поверхности, размерами и высотой над уровнем моря или основным водоприемником. Чем больше болотная впадина, в которой формируется массив, и чем выше она расположена, тем быстрее при прочих равных условиях она достигает олиготрофной фазы развития и особенно ее грядово-мочажинной стадии.

В восточной части таежной полосы наблюдается иная картина распределения выпуклых моховиков, чем в западной части. Максимум развития их связан с равнинными, низменными частями рельефа (полого-волнистыми ледниковыми и плоскими озерно-ледниковыми равнинами). Для повышенных участков волнисто-моренной равнины характерно развитие болотных систем класса логов и сточных котловин, переживающих евтрофно-мезотрофную, мезотрофно-олиготрофную и олиготрофную фазы развития. На аэроснимках ряда водораздельных пространств также виден «болотный рисунок», напоминающий Балтийский щит. Широко распространены здесь также болотные урочища класса склонов, переживающие олиготрофную фазу развития.

Южнее рельеф поверхности Русской равнины становится более расчлененным. Исключение составляет обширная Припятская низменность с широко развитыми на ней пойменными болотами. В полосе распространения широколиственных лесов очень многие болотные массивы переживают евтрофную фазу развития. Большой частью их распространение приурочено к долинам рек и речек. Таким образом, в средней части Русской равнины условия рельефа поверхности определяют возможность развития болотных урочищ и отчасти систем урочищ класса логов, сточных котловин и

склонов, а также пойменных (переживающих евтрофную и евтрофно-мезотрофную фазы развития). Климатические особенности и рельеф ограничивают развитие болотных урочищ класса замкнутых котловин.

Степень слитности систем болотных урочищ особенно велика в пределах плоских ледниковых и морских равнин. Примером очень слитной системы болотных урочищ класса замкнутых котловин, достигшей наиболее зрелой стадии развития олиготрофной фазы, являются болотные системы между-речья Мезени-Кулоя, исследованного В. Н. Кирюшкиным [20], а также очень сложная и слитная болотная система — болото «Вадье», исследованное тем же автором [21].

Районирование болотных массивов на основе аэроаэроземного метода исследования Архангельской области проведено группой исследователей [22]. Ознакомление с этими материалами позволит лицам, заинтересованным в использовании аэро- и космических съемок, увидеть, какие широкие возможности открываются для них при применении этих методов исследования.

Западно-Сибирская низменность. Представляет собой огромную плоскую чашу. Равнинность ее поверхности нарушается рядом низких поднятий — «материков», возвышающихся над «болотным морем». Равнинность территории и отсутствие барьера, защищающего ее от поступления холодных воздушных масс из Арктики, способствует проявлению резкой зонально-климатической выразительности не только на растительности суходолов, но и некоторых болотных массивов. Специфические особенности этой страны сказываются в значительном смещении к югу границы тайги, отсутствии полосы широколиственных лесов и наличии полосы мелколиственных.

Ведущими географическими типами болот являются огромные болотные системы Западно-Сибирской группы типов. На пространствах между «материками» они представлены очень слитными болотными системами, в которых часто не удается (по аэрофотоснимкам) обнаружить первичные очаги заболачивания. Многие из них создают впечатление гигантских болотных урочищ с уплощенным озерково-грядово-мочажинным центром и грядово-мочажинными склонами, граничащими с узкими полосками лесов, тянущихся вдоль рек. К северу от Сибирских увалов бугры и гряды на болотах изобилуют кустистыми лишайниками, а к югу от увалов на них развит сплошной сфагновый покров, обильны болотные кустарнички. На повышениях микрорельефа растет сосна и кедр, пространства между буграми и грядами — сфагновые (пушицево-сфагновые или шейхцериево-сфагновые). На междуречье Оби и Иртыша к югу от Ше-

гарки, притока Оби, и Сыма, притока Енисея, озерково-мочажинно-грядовые комплексы в центральных частях болотных систем теряют свое значение и заменяются олиготрофными грядово-мочажинными комплексами. К югу от Иртыша (на широте Тобольска) болотные массивы, переживающие олиготрофную фазу развития, сменяются болотными системами склонов с осоково-гипновыми и тростниковыми группировками в сочетании с рядами (сфагновыми выпуклыми моховиками, облесенными сосной и кедром). Интересны также принципы районирования болотных массивов, проведенные А. В. Предтеченским с соавтором [25]. При исследовании болотных массивов Западной Сибири широко использовались аэрометоды.

Надо заметить, что в некоторых районах Западно-Сибирской низменности, даже в пределах очень слитных болотных систем, удалось обнаружить по аэрофотоснимкам первичные очаги заболачивания и увязать их типы с типами, установленными для Европейской части СССР. Несмотря на внешнее сходство в их облике имеются и специфические отличия, касающиеся строения торфяной залежи, а часто и ее мощности.

Сопоставляя характеристики болотных образований рассмотренных трех стран, легко убедиться в том, насколько сильно отличаются друг от друга их природные условия и как это сказывается на степени заболоченности, распределении массивов и их классах и типах, а также их принадлежности к тому или иному ходу развития, определяемой формой болотных впадин и формами сеток стекания водных потоков, распределяющих водно-минеральное питание во времени и пространстве. Ход развития болотных урочищ определяет закономерности смен современного растительного покрова и отлагаемых им видов торфа. Правильному пониманию этих процессов мы обязаны разработанным на новой основе гидрологии [17, 18] и гидрофизике [26] болот.

Как следует из изложенного, эти различия в значительной степени связаны с генетическими формами рельефа, определяющего формы болотных впадин и высоту их надболотных склонов [6], и с меридиональной протяженностью той или иной страны. Большое влияние на размещение и степень распространенности болотных массивов имеют условия гидрографии и гидрогеологии. Это влияние особенно сильно сказывается по мере продвижения к югу. Объем статьи не позволяет более подробно остановиться на всех признаках различий между сочетаниями различных географических типов болотных массивов в природно-территориальных комплексах разного объема, и приходится ограничи-

ваться ссылками на то или иное дробное районирование отдельных участков территории рассматриваемых стран.

Одним из сложных вопросов дешифрирования болотных массивов на аэро- и космических фотоснимках является выяснение их собственной структуры. Структура болотных массивов может быть представлена: болотными урочищами (болотными мезоландшафтами — mire complex); их сочетаниями в форме систем болотных урочищ (болотными макроландшафтами — mire system различной степени сложности и слитности). Как те, так и другие слагаются из подчиненных им мельчайших генетически однородных (для данного урочища и системы) частей — болотных фаций (болотных микроландшафтов — mire sites). Среди них надо различать основные и второстепенные — локальные [3, 4, 6, 8]. Закономерное распределение первых определяет природу географических типов болотных массивов, а изображения вторых — их индивидуальную специфичность. В большинстве случаев они представлены различными элементами болотной водопроводящей сети. Через их посредство наиболее сильно и глубоко сказываются нарушения в водном режиме болотных урочищ и их систем. Эти нарушения могут вызываться резкими изменениями в природных территориальных комплексах, вмещающих массивы, например неотектоническими движениями земной поверхности, крупными гидросооружениями, сплошными распахками больших площадей и пр.

Менее глубокие нарушения, в пределах собственно болотных урочищ или их систем, обычно бывают связаны с проведением на них осушительной сети. На аэро- и космических снимках разных лет хорошо видны итоги, например, лесосушительных работ. Анализ таких снимков позволяет понять, какие из связей внутри самого болотного массива и включающего его ландшафта полезно или наоборот опасно нарушить. Степень дешифрируемости в этом отношении аэроснимков зависит от ряда причин: масштаба и качества аэрофотоснимков, степени закрытости территории, сложности ее геолого-геоморфологического строения и степени подготовленности специалиста.

При использовании любых дистанционных изображений земной поверхности всегда встает вопрос о степени точности дешифрирования и надежности, проводимых при картировании границ (табл. 8).

Весьма существенно при использовании дистанционных методов иметь возможность прогнозировать закономерности распределения торфяных залежей [10]. Для этих целей необходимо использовать крупномасштабные аэрофотоснимки. По прямым признакам мощность торфа определить нельзя, надо пользоваться комплексными признаками формы болот-

Степень достоверности дешифрирования болотных массивов по аэрофотоснимкам среднего масштаба (лесная зона СССР)

Цели дешифрирования	Достоверность в %	Примечание
1. Установление классов болотных урочищ	80—90	
2. Установление степени сложности болотных систем	70—80	
3. Картирование площадей открытых болот в границах нулевой залежи		
а) среди плоских ледниковых и водноледниковых равнин	85—90	
б) в пределах холмистого рельефа	95—100	
4. Картирование площадей в разной мере облесенных болот		Достоверность дешифрирования определялась методом статистических расчетов В. Н. Кирушкиным
а) облесенных болот среди плоского рельефа	75—80	
б) лесных болот в различных типах рельефа	30—40	
5. Дешифрирование растительных группировок		
а) с древесным ярусом	90—95	
б) травяных	70—80	
в) моховых	60—70	
6. Дешифрирование болотной гидрографической сети		
а) озер, озерков, мочажин	90—100	
б) ручьев и топей	90—100	
в) мелноративных каналов	100	
7. Определение ориентировочной мощности торфа в пределах болотных урочищ определенного класса		
а) логов	70—80	
б) замкнутых впадин	60—75	
в) сточных впадин	50—70	
г) стариц	60—70	

ных впадин и историей генезиса болотных массивов. Имея эти данные, а также данные о мощностях торфа на ключевых болотных массивах, можно указывать глубины торфа для генетически однотипных болот.

Особое место по значимости и широте размаха использования представляют для народного хозяйства СССР заболоченные земли и некоторые типы болот как лесной мелиоративный фонд. Занимаемая им в гослесфонде площадь, по данным Е. Д. Сабо [28], составляет 228 млн. га. Многие из них могут быть осушены в целях повышения продуктивности, растущего на них леса. В настоящее время к первоочередному гидrolесомелиоративному фонду (ГЛМФ), подлежащему осушению 25 млн. га в Европейской части Союза; 11 млн. га на Урале и в Западной Сибири и 4 млн. га на Дальнем Востоке. Осушение первоочередного ГЛМФ производится и в настоящее время и будет продолжено после 2000 г.

Доказано, что средний дополнительный прирост древесины на осушаемых землях составляет 2—5 м³ с 5 га в год. Таким образом, только при осушении первоочередного ГЛМФ в Европейской части РСФСР, где наблюдается истощение запасов спелой древесины в лесах на естественно дренированных почвах, можно будет получить в год дополнительно до 60—80 млн. м³ древесины. Этим путем можно будет уравновесить существующий здесь переруб по хвойным породам. За 1,5 с лишним века с начала производства гидrolесомелиоративных работ в нашей стране, по неполным данным, осушено лесов и болот не менее 5,0 млн. га; в том числе с 1956 г. 4,0 млн. га. После принятия специальных правительственных постановлений мелиоративные работы особенно широкое развитие получили в 1966—1976 гг. За этот период в осушение вовлечено 3,1 млн. га земель ГЛМФ. Сейчас гидrolесомелиоративным работам придается еще большее значение в связи с развитием сельскохозяйственного производства в Нечерноземной зоне РСФСР. В десятой пятилетке (1976—1980) основной их объем будет выполнен именно на этой территории. Непременным условием высокой их лесоводственной, экономической и социальной эффективности гидrolесомелиоративных работ является правильный выбор объектов и параметров лесоосушительных систем. Только тогда они будут соответствовать требованиям рационального использования лесных ресурсов и охраны природы. Кроме того, размещение дренирующих систем на местности должно делаться с учетом направления естественного стока вод. В прошлые годы наблюдались ошибки и просчеты, поэтому фактическая эффективность гидrolесомелиоративных работ оказывалась ниже расчетной, а в ряде случаев было отмечено и их негативное влияние на природную среду. В частности не все осушаемые открытые болота облесились. Естественная же растительность на таких болотах оказалась угнетенной и некоторые ее ценные виды, на-

пример, клюква, погибли, а ведь клюква является ценным пищевым и лекарственным растением и предметом экспорта.

Надо отметить еще и то, что материалы наземной топографической съемки не всегда позволяют надежно выявить границы ГЛМФ и правильно распределить осушительную сеть на местности. Таким образом, возникла необходимость объективно оценить результаты ранее выполненных работ по лесосушению с тем, чтобы избежать ошибок в будущем. Единственным методом, позволяющим провести эту работу быстро и на должном уровне, является использование материалов аэрофотосъемки.

Не меньшее значение имеет и применение этого метода для типизации болотных массивов и выявления их естественной гидрографической сети. Весьма полезно и необходимо для достижения этой цели провести детальное районирование территории, подлежащей мелиорации в болотном отношении; в пределах выделенных районов выявить, какие из географических типов болотных массивов дали положительный или отрицательный эффект. Материалы аэрофотосъемки позволяют довольно точно выявить границы ГЛМФ [16], его состояние, а также состояние осушительных систем.

Ревизию осушенных земель надо производить периодически, по этой причине необходимо исследователям иметь в распоряжении материалы залетов разных лет на значительные территории осушенных и намеченных к осушению земель. Съёмочная работа, а также хранение исходного материала должны быть централизованы. Хранение должно осуществляться одной организацией, которая будет выдавать эти материалы по заявкам всех других организаций и ведомств. Создание подобного банка материалов давно назрело. Эти материалы могут быть использованы и значительно шире, например, в целях охраны природы и учета воздействия на нее деятельности человека в форме различных инженерных сооружений или сельскохозяйственного или какого другого использования территории.

Применение дистанционных методов для изучения природы болот и заболоченных земель различных типов и определение их значимости пока не может быть решено упрощенным механическим путем. Необходимо возможно глубже понять связи болотных урочищ и их систем с вмещающей их географической средой, а также учесть и то влияние, которое они сами могут на нее оказывать. Весь этот комплекс сложных вопросов требует для своего решения привлечения к исследованию болотных массивов специалистов различного профиля и высокой эрудиции. Это касается как болотных массивов вообще, так и болотных массивов — ключей.

Очень большое значение имеет также использование новых методов дистанционных съемок и, в частности, съемок из космоса. В книге «Картины ландшафтов мира» ее авторы И. Бодехтель и др. [30] приводят прекрасный спектральный снимок болот Западной Сибири, междуречья рек Пим, Юган, Обь. На нем хорошо видны не только болотные системы в целом, формы их поверхности, но также закономерности распределения по их территории основных болотных фаций и болотная гидрографическая сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Т. Г., Кирюшкин В. Н. Районирование болот Архангельской области.— В сб.: Северо-Запад Европейской части СССР, вып. 6, Л., изд. ЛГУ, 1970, с. 81—113.

2. Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск, 1959, с. 306.

3. Галкина Е. А. Пути использования аэрофотосъемки в болотоведении.— Ботанический журнал, 1953, т. 38, № 6, с. 893—910.

4. Галкина Е. А. Болотные ландшафты и принципы их классификации.— Сб. научных работ Ботанического ин-та им. В. Л. Комарова АН СССР, выполненных в Ленинграде за три года Великой Отечественной войны (1941—1943). Л., 1946, с. 139—156.

5. Галкина Е. А. Сфагновые болота. — В кн.: Растительный покров СССР (пояснительный текст к геоботанической карте СССР), т. II, М., изд. АН СССР, 1956, с. 553—572.

6. Галкина Е. А. Болотные ландшафты Карелии и принципы их классификации. Тр. Карельского филиала АН СССР, вып. XV. Петрозаводск, 1959, с. 3—48.

7. Галкина Е. А. Методы использования аэрофотоснимков для типизации и картирования болотных массивов.— Уч. зап. Петрозаводского университета, т. XII, вып. 2. Биол. науки, Петрозаводск, 1964, с. 5—24.

8. Галкина Е. А. Значение аэрофотосъемки для установления болотных стратиграфических единиц.— Доклады Комиссии аэросъемки и фотограмметрии, вып. 2. Л., изд. ГО СССР, 1966, с. 5—24.

9. Галкина Е. А. Использование аэроснимков для установления закономерностей распределения болотных урочищ (различных классов и групп типов) по территории лесной зоны СССР.— В кн.: Аэросъемка и ее применение. Л., «Наука», 1967, с. 329—336.

10. Галкина Е. А., Кирюшкин В. Н., Стариченков И. П. К вопросу определения относительных мощностей торфа по аэроснимкам.— Доклады Комиссии аэросъемки и фотограмметрии, вып. 2. Л., изд. ГО СССР, 1966, с. 35—39.

11. Галкина Е. А., Козлова Р. П. Принципы районирования болот (на примере районирования болот Южной и Средней Карелии).— В сб.: Очерки по растительному покрову Карельской АССР. Ин-т Биологии Карельского филиала АН СССР, Петрозаводск, 1971, с. 123—176.

12. Григорьев А. А. Основы теории физико-географического процесса.— Тр. Второго Всесоюзного Географического съезда, т. I. М., 1948.

13. Елина Г. А. Внутриландшафтное районирование болот Прибеломорья и примыкающих к нему ландшафтов на основе комплексного картографирования.— В сб.: Очерки по растительному покрову Карельской АССР. Петрозаводск, 1971, с. 194—206.

14. Естественно-историческое районирование СССР, т. I. М.-Л., изд. АН СССР, 1946.

15. Физико-географическое районирование СССР. Физико-географический атлас Мира. 1964, с. 310.
16. Елпатьевский М. М., Кирюшкин В. Н., Константинов В. К. Лесохозяйственное освоение болот. М., «Лесная промышленность», 1978, с. 134.
17. Иванов К. Е. Основы гидрологии болот лесной зоны. Л., Гидрометеониздат, 1957, с. 500.
18. Иванов К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л., Гидрометеониздат, 1975, с. 273.
19. Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины, м-б 1 : 2500000, М., 1977.
20. Кирюшкин В. Н. О некоторых болотных системах Архангельской области.— Ботанический журнал, 1965, т. 50, № 3, с. 375—376.
21. Кирюшкин В. Н. Болотная система «Вадье» и пути ее развития.— В сб.: Природа болот и методы их исследований. Л., «Наука», 1967, с. 47—49.
22. Кирюшкин В. Н., Стариченков И. П., Тихомиров Л. И. Влияние геолого-геоморфологических условий местности на формирование болот (на примере болот северной части Архангельской обл.)— В сб.: Природа болот и методы их исследований. Л., «Наука», 1967, с. 11—14.
23. Мещеряков Ю. А. О морфологической структуре Северо-Запада Русской равнины.— Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз. М., 1950.
24. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим. Л., Гидрометеониздат, 1976, с. 450.
25. Предтеченский А. В., Скобеева Е. И. Геоморфологическая приуроченность различных типов болот центральной части Западной Сибири и применение аэрометодов для их изучения.— В сб.: Типы болот СССР и принципы их классификации. Л., «Наука», 1974, с. 181—187.
26. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л., Гидрометеониздат, 1961, с. 359.
27. Романова Е. А. Геоботанические основы гидрологического изучения верховых болот. Л., Гидрометеониздат, 1961, с. 244.
28. Сабо Е. Д. Лесохозяйственная и экономическая эффективность осушения лесных площадей.— В кн.: Повышение продуктивности и сохранности лесов. М., «Лесная промышленность», 1964, с. 473—481.
29. Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири. М., «Наука», 1977. 245 с.
30. Boaschtel J., Gierloff-Emden H. C. Weltraumbilder die dritte Entdeckung der Erde. München. 1974.
31. Cajander A. Studien über die Moore Finlands. Fennica, 30, Helsinki, 1913.
32. Osvald H. Hochmoortypen Europas. Festschrift C. Schröter Veröffentl. des Geogr. Inst. Rübel in Zürich, H. 3, 1925.

Б. В. ШИЛИН

ТЕПЛОВАЯ АЭРОСЪЕМКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ В СССР

Практическая и научная актуальность разработки техники и методики тепловой аэросъемки (ТАС) определяется тем обстоятельством, что с изменениями температурного поля связано большое количество объектов и явлений на земной поверхности и некоторой глубине от нее. Возможность получения в короткие сроки информации о распределении температуры с высоким температурным и геометрическим разрешением открывает новые перспективы в решении ряда задач исследования природных ресурсов Земли (ИПРЗ), где традиционные дистанционные методы, главным образом, аэрофотосъемка, неэффективны или требуют значительных затрат времени и средств.

За последнее десятилетие исследования велись в следующих направлениях:

разработка и внедрение технических заданий на самолетные тепловизоры для ИПРЗ;

установление зависимости температурного поля объектов земной поверхности от их теплофизических и радиационных характеристик и метеорологических условий;

разработка основных положений методики аэросъемки и интерпретации ее материалов при решении наиболее важных задач ИПРЗ.

По первому направлению разработки завершились созданием отечественной промышленностью серийного самолетного двуспектрального тепловизора «Вулкан».

По второму направлению разработана теплоинерционная модель формирования температурного поля под воздействием солнечной радиации путем решения на ЭВМ дифференциального уравнения теплопроводности с граничным условием на земной поверхности в виде уравнения теплового баланса. Построены суточные кривые температуры объектов

для различных условий и регионов, позволяющие дать оценку эффективности ТАС и основные рекомендации по методике аэросъемки [1].

Основные положения методики аэросъемки и интерпретации ее данных разработаны для решения задач исследования действующих вулканов, районов активной современной гидротермальной деятельности, гидрогеологии и инженерной геологии, геологического картирования, гидрологии, мелиорации и ирригации, исследования водной среды, снежного и ледяного покрова, охраны окружающей среды и т. д. При этом использованы обширные материалы многолетних экспериментальных ТАС отдельных участков в пределах разных регионов СССР (в том числе на Камчатке, БАМе, в Казахстане, Средней Азии и т. д.).

С помощью предложенной модели формирования температурного поля было исследовано влияние основных «температуροобразующих» факторов — тепловой инерции, альбедо, ветра, облачности, испарения, геотермального потока, ориентировки поверхности (рельефа) и др.

Для тепловой инерции — теплофизического параметра $p = \sqrt{\lambda c \rho}$ (где λ — теплопроводность, c — теплоемкость, ρ — плотность), определяющего скорость восприятия и отдачи солнечного тепла, были сделаны оценки по справочным данным λ , c и ρ пределов ее изменения. Оказалось, что реальный интервал изменений p находится в пределах 500—3000 единиц тепловой инерции $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{с}^{1/2}\text{К}}\right)$ Расчеты для

различных широт, суммарной солнечной радиации, безоблачной и безветренной погоды, постоянного альбедо и значений p равных 500, 1000, 1500, 2000, 3000 $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{с}^{1/2}\text{К}}\right)$ позволили сделать вывод о высокой эффективности ТАС как метода дифференциации объектов земной поверхности по их тепловой инерции, так как полученные температурные контрасты оказались очень велики. Например, для условий июля месяца, широты 47° максимальные температурные перепады в послеполуденное время для крайних значений p (3000 и 500) могут достигать 25°C , а в ночное время — 16°C . В дневное время сильнее нагреваются объекты с наименьшим значением тепловой инерции; ночью же наблюдается обратная картина — наиболее теплыми становятся объекты с максимальным значением тепловой инерции. Иными словами, с увеличением тепловой инерции происходит уменьшение суточного перепада температуры объектов, они медленнее нагреваются и медленнее остывают. Это приводит к тому, что два раза в сутки — вечером после захода Солнца и утром после восхода — происходит инверсия контрастов объектов

с различной тепловой инерцией. В момент инверсии контрасты равны нулю, а затем быстро возрастают.

В конкретном регионе может иметь место набор объектов с меньшими интервалами значений тепловой инерции, но в этом случае возникающие температурные контрасты легко могут быть зафиксированы современными высокочувствительными тепловизорами.

Сравнение результатов расчетов для различных значений суммарной радиации позволяет сделать вывод, что температурные контрасты заметно возрастают с ее увеличением, т. е. эффективность ТАС должна падать с увеличением широты (при прочих равных условиях).

Расчеты для наиболее распространенных значений альбедо природных образований (10, 20, 30, 40%) показали, что изменения альбедо оказывают на ход суточной температуры почти такое же влияние, что и изменения тепловой инерции, т. е. различия в альбедо, имеющие место в реальных условиях, обуславливают формирование значительных температурных контрастов. Существенная зависимость температурного поля от изменений альбедо является причиной заметного тонального сходства теплового аэроснимка и аэрофотоснимка. Это предопределяет в общем случае сферу применения ТАС для решения тех задач ИПРЗ, где дифференцируемые объекты мало различаются по отражательной способности (когда эффективность основного дистанционного метода ИПРЗ—аэрофотосъемки — невелика).

Для природных образований, различающихся только по альбедо, в динамике их суточной температуры не наблюдается инверсии контрастов. Объекты, имеющие большой нагрев днем, сохраняют это соотношение и ночью.

Существенным приближением к реальным условиям вышеописанных расчетов является учет влияния ветра и облачности, оказывающих большое влияние на характер температурного поля. Так, для июля месяца и широты 47° при ветре 4 м/с дневной перепад температур упал с 25 до 7°C , а ночной — с 16 до 5°C . Влияние облачности при факторе облачности $p=0,6$ примерно эквивалентно влиянию ветра скоростью 4 м/с. Таким образом, ветер и облачность сильно нивелируют температурное поле и в принципе снижают эффективность ТАС.

Для увлажненных участков земной поверхности в формировании их температурного поля ведущую роль среди других составляющих теплового баланса играет испарение. Моделирование его влияния для сильно увлажненных поверхностей (орошаемые земли) показало, что испарение очень сильно понижает температуру деятельной поверхности. Рас-

четные данные удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Влияние испарения на формирование пониженного температурного поля заметно зависит от влажности воздуха. Расчеты показывают снижение температурных контрастов сухих и увлажненных участков почв и горных пород с увеличением влажности приземного слоя атмосферы.

Очень сильное влияние влажности на характер температурного поля указывает на большие возможности ТАС для качественного и количественного картирования влажности при решении широкого круга задач гидрогеологии, инженерной геологии, геологии, мелиорации, гидрологии.

Для водных объектов, температурное поле которых определяется высокой теплоемкостью воды и наличием термической конвекции и турбулентного перемешивания, оценочные расчеты по предлагаемой модели проводились с использованием «эффективной» тепловой инерции, учитывающей процессы тепломассопереноса. Получено, что водные объекты формируют однородное температурное поле с небольшими плавными контрастами. Сравнение расчетов для водной среды с температурными кривыми для объектов суши показывает, что водные объекты на тепловых аэроснимках должны резко контрастировать на фоне других элементов ландшафта — ночью как очень теплые, днем — как очень холодные.

Расчеты позволили оценить минимальное значение геотермального потока, которое на существующих техническом и методическом уровнях может быть зафиксировано тепловой аэросъемкой. Для этой важной для геологии и региональной геофизики величины получено значение $10-20$ Вт/м².

Большие значения температурных контрастов получены для ряда форм рельефа различной экспозиции, что в принципе указывает на высокую «чувствительность» ТАС к изменениям рельефа и возможность использования этой особенности ТАС и тепловых аэроснимков при дешифрировании рельефа как основного индикатора глубинного геологического строения.

В целом результаты моделирования показали, что температурное поле обладает высокими индикационными свойствами по отношению к большому количеству объектов и явлений земной поверхности, а тепловая аэросъемка является эффективным методом ИПРЗ. С другой стороны, быстрые изменения температурного поля во времени и его большие амплитуды, искажения, вносимые системами сбора и регистрации информации, в принципе не позволяют подобрать такие условия съемки при решении конкретной задачи

ИПРЗ, когда исследуемый объект выделяется в температурном поле наилучшим образом, а «окружающий температурный фон» создает наименьшие помехи для обнаружения и идентификации объекта. В связи с этим для решения любой практической задачи следует выполнять тепловую аэросъемку многократно. Исключение не составляют и объекты с высокой аномальной температурой (действующие вулканы, термальные поля, лесные пожары и т. д.).

Сопоставлением характера изображения исследуемых объектов на тепловых аэроснимках, полученных при различных условиях, анализом динамики температурного поля с учетом влияния всех факторов, определяющих формирование температурного поля, можно осуществить однозначное полное решение любой из рассмотренных ниже задач ИПРЗ.

Вулканология. Здесь наиболее актуальны вопросы: разделение среди неактивных вулканов действительно потухших и вулканов, имеющих слабую активность; изучение структуры термальных полей действующих вулканов; изучение изменений термальных полей во времени с целью прогнозирования возрастания активности вулканов.

Изучение районов гидротермальной активности, поиски термальных вод. В соответствии с принятой теплоинерционной моделью формирования температурного поля, а также учитывая малый динамический диапазон современных тепловизоров, можно показать, что для гидротермальных объектов не существует оптимальных условий аэросъемки. Так, в дневное время на тепловом аэроснимке появляются рельефные и теплоинерционные аномалии, близкие по интенсивности к гидротермальным. Ночью из-за инверсии вода—суша возникают аномалии от холодных водных объектов и т. п. Только одновременное дешифрирование разновременных аэроснимков позволяет однозначно выделить все термальные поля. Рис. 11, 12 (дневные и ночные тепловые аэроснимки кальдеры Узон на Камчатке) в какой-то степени иллюстрируют это положение.

На дневных аэроснимках термопроявления (горячие источники, газопаровые струи, грязевые котлы) четко выделяются только на плоских участках кальдеры. На участках мелкорасчлененного рельефа (в верхней части аэроснимков) гидротермы маскируются рельефными аномалиями. На ночном аэроснимке исчезают рельефные аномалии, но появляются аномалии от холодных озер и растительного покрова.

Одновременная съемка кальдеры Узон двуспектральным тепловизором в диапазонах 8—13 мкм и 3—5 мкм позволила выделить в пределах основных термальных полей наиболее



Рис. 12. Ночной тепловой аэроснимок деры Узон и схема дешифрирования некоторых объектов кальдеры. Спектральный интервал 3.2—5.3 мкм. Время съемки 17 час. 15 мин. Высота полета 3100 м. Условные обозначения: 1 — гребень кальдеры; 2 — оползневая долина на склоне кальдеры; 3 — продукты оползня на дне кальдеры; 4 — тектоническое нарушение западного фумарольного поля; 5 — термальные поля (II — центральное, III — западное); 6 — озера; 7 — контуры площади избыточного увлажнения на дне кальдеры.

активные очаги конвективного выноса тепла.

Результаты сопоставления положения закартированных тепловой аэросъемкой гидротерм восточного вулканического пояса Камчатки с особенностями геологического строения региона позволяют выявить их приуроченность к крупным активным зонам разрывных нарушений северо-восточного и субширотного простираний.

Другие виды задач, связанные с изучением аномального температурного поля. **Лесные пожары.** Показана высокая эффективность ТАС при обнаружении лесных пожаров, изучении их внутренней структуры, оценке эффективности противопожарных мероприятий, картировании участков активного горения в условиях густого дыма. В частности, при изучении таежных пожаров выявлено, что активное горение происходит только на отдельных локальных участках по периметру пожара. Это имеет большое практическое значение для рационального

Рис. 14. Ночной тепловой аэроснимок кальдеры Узон. Спектральный интервал 1.8—5.3 мкм. Время съемки 18 час. 40 мин. Высота полета 2200 м.



распределения людей и техники для тушения пожара.

Обнаружение и контроль энергетических потерь из индустриальных и жилых объектов. Сюда относятся потери тепла зимой из промышленных и жилых зданий, систем теплоснабжения, «утечки» из высоковольтных ЛЭП. Все они в принципе могут быть успешно обнаружены ТАС.

Пожары в отвалах угольных и сланцевых шахт. ТАС здесь применима при тушении пожаров и устранении отвалов при рекультивации земель.

Тепловая аэросъемка при региональных геологических исследованиях. Получение новой геологической информации от ТАС по сравнению с другими дистанционными методами возможно при: использовании высокой «чувствительности» метода к изменениям рельефа для подчеркивания определенных особенностей рельефа как индикатора геологического строения; картировании объектов, резко отличающихся по тепловой инерции. В первую очередь это относится к объектам, имеющим повышенную влажность — зонам разломов, тектоническим контактам, погребенным руслам рек и т. д.

На рис. 11 при низком положении Солнца особенно скульптурно выглядят элементы микрорельефа. Благодаря этому только на этом аэроснимке удалось отдешифровать кольцевую вулканическую структуру западного фумарольного поля и пересекающий ее разлом, по которому произошло смещение блоков, а также выявить оползневое происхождение крупной долины на склоне кальдеры.

Тепловая аэросъемка при решении задач гидрологии, гидрогеологии, инженерной геологии, мелиорации и ирригации. Результаты расчетов и экспериментальные наблюдения показали, что температура является чувствительным индикатором изменения влажности подстилающей поверхности. Увлажненные объекты обычно находят отражение в пониженном температурном поле днем и повышенном ночью. Особенно это относится к участкам с очень высокой влажностью и водным объектом. Для слабо- и среднеувлажненных поверхностей эта закономерность нарушается из-за сложного и сильного охлаждающего влияния испарения днем и ночью. Для слабо увлажненных объектов имеет место изменение влажности в течение суток.

На рис. 11, 12 можно проследить особенности изменения контрастов водных и увлажненных объектов кальдеры Узон. На рис. 1 благодаря охлаждающему влиянию испарения четко дешифрируется холодная заболоченная площадь цент-



Рис. 13. Тепловой аэроснимок участка осушенных сельскохозяйственных угодий в нечерноземной зоне РСФСР. Спектральный интервал 3.2—5.3 мкм. Время съемки 18 час. 15 мин. Высота полета 1500 м.

ральной части кальдеры. В ночное время этот контур не дешифрируется. На плоских участках кальдеры (как очень холодные) выделяются ручьи, речки, озера, родники. В вечернее время (рис. 2) из-за инверсии вода—суша (как теплые) выделяются крупные и мелкие озера. Холодные быстрые речки на рис. 12 не выделяются. Их температура — близка к температуре суши.

Рис. 13 иллюстрирует изменение влажности и, следовательно, эффективность мелиорации в пределах ряда полей в пойме реки. Дренажные каналы делят участок на ряд полей примерно равного размера.

В отличие от почти однородного тона аэрофотоснимка на тепловом аэроснимке наблюдаются значительные изменения контрастов в пределах осушаемых полей. Вверх по аэроснимку влажность уменьшается. Наиболее увлажненной является средняя часть самого нижнего поля (1); она примерно равна на следующих двух полях (2, 3), еще меньше на поле 4; следующие поля (5, 6, 7)—наиболее сухие, и, наконец, на самых верхних полях (8, 9) влажность несколько повышается.

Таким образом, по результатам анализа материалов ТАС может быть сделан вывод, что наиболее осушенными являются средние поля, где эффективность мелиорации оказалась наилучшей. При инженерно-геологических исследованиях ТАС весьма эффективна при изучении строящихся насы-

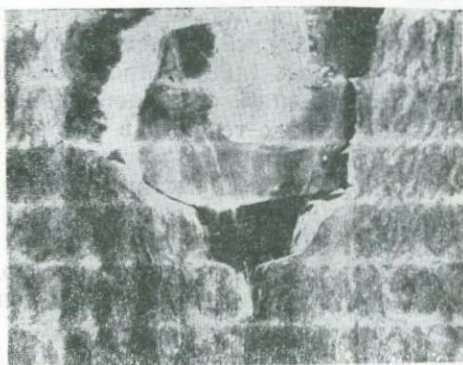


Рис. 14. Ночной тепловой аэроснимок такыра в центральных Каракумах. Спектральный интервал 1.8—5.3 мкм. Время съемки 6 час. 40 мин.

пей железных дорог, газопроводов, шоссе и т. д. с точки зрения их возможного разрушения на участках подтопления поверхностными и близповерхностными водами, где возможно резкое нарушение их гидрологического режима. Со-

ответствующие материалы получены при обследовании трассы БАМ и газопровода Уренгой—Надым.

Рис. 14 иллюстрирует практическое применение ТАС при изучении изменений влажности в аридной зоне.

Рис. 14 — ночной тепловой аэроснимок участка такыра в Каракумах. Аномалия в центральной части такыра связана с контуром повышенной влажности (несколько процентов), который, в свою очередь, связан с известной подтакырной линзой пресных вод. В дневное время мощная инсоляция высушивает верхний слой такырной почвы и на его поверхности формируется однородное температурное поле. В ночное время на поверхности такыра из-за капиллярного подтягивания влаги образуется участок повышенной влажности с небольшими положительными температурными контрастами.

На основании данных рис. 16, а также других аналогичных материалов, полученных в пустынных и полупустынных районах СССР, можно сделать вывод, что основными направлениями применения здесь ТАС являются: поиски участков неглубоко залегающих подземных вод для целей питьевого водоснабжения; контроль за водораспределением на орошаемых территориях с целью наиболее эффективного и экономичного использования водных ресурсов.

Тепловая аэросъемка при изучении водной среды. Так как практически все явления в водных массах связаны с перераспределением тепла, представляется очевидной перспективность применения ТАС для изучения структуры и динамики различных разномасштабных процессов в водной среде — от крупнейших течений и вихреобразных структур в океанах и морях до мелких течений в озерах и реках. При этом полученные ТАС материалы могут быть использованы для решения практических задач климатологии, морской навигации, рыболовства, изучении гидрологического и гидрохимического режима водоемов, берегового строительства, поисков мест подводной разгрузки грунтовых вод и участков благоприятных для образования россыпей ценных минералов и т. д. Разработка новых быстрых методов исследования температурного поля водной поверхности особую актуальность приобретает в связи с поисками полезных ископаемых и геологическим картированием обширных шельфовых зон. Несомненны большие возможности ТАС при изучении загрязнений водной среды.

Тепловая аэросъемка при изучении снежно-ледяного покрова. ТАС является перспективным методом получения информации о малоконтрастных холодных снежно-ледяных формах. В первую очередь это относится к изучению состояния ледяного покрова водной поверхности как в научных целях,

когда изучается его сезонное распространение, особенности формирования и т. д., так и в практических — при ледовой проводке судов, выборе участков размещения станций и аэродромов. Имеются материалы, свидетельствующие о хороших возможностях метода при инженерно-геологических исследованиях снежно-ледяного покрова суши.

Проведенные исследования показали, что ТАС является новым эффективным методом ИПРЗ, так как температурное поле обладает устойчивыми индикационными свойствами по отношению к ряду специфических объектов и явлений земной поверхности. Разработаны теоретические основы ТАС, позволяющие прогнозировать эффективность ее использования, основные положения методики аэросъемки и интерпретации ее материалов при решении конкретных задач ИПРЗ. Показано, что из-за быстрой периодической изменчивости температурного поля для решения практически любой задачи ИПРЗ необходимо проводить многократную регистрацию этого поля. Если в варианте аэросъемки это представляется затруднительным и обычно проводятся дневная и ночная съемка, то в случае съемки со спутников, когда периодичность регистрации мало чем ограничена, метод сопоставления серии разновременных изображений, представляется наиболее перспективным для извлечения наиболее полной информации о природных ресурсах.

Г. Б. ГОНИН

ЕСТЕСТВЕННАЯ ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

С развитием космических съемок, когда специалисты по различным аспектам изучения Земли стали получать в свои руки космические фотоснимки (КФС), а затем и изображения, выполненные сканерами, широкое распространение стал находить термин «генерализация». Этот термин отражает многие специфические свойства космических снимков, и уже большое количество работ посвящено этому вопросу.

Применительно к вопросам общегеографического дешифрирования КФС Б. В. Виноградовым в монографии [14] было введено понятие тематической генерализации: «Тематическая генерализация представляет собою сложный процесс объединения более мелких типологических и хронологических единиц растительного и почвенного покрова, форм рельефа и геологических образований в более крупные при переходе от наземного наблюдения и аэросъемки к мелко-масштабной съемке из космического пространства, который связан с уменьшением пространственного разрешения и увеличением обзорности». При этом уровень генерализации принимался тождественным масштабу изображения. Такой же подход к изучаемому явлению изложен в последующих работах [4—6], в которых рассматриваются спектральные и геометрические виды генерализации. Аналогичное изложение явления генерализации дано в книге А. А. Григорьева [11] и близкий подход приводится в учебном пособии В. И. Кравцовой [16].

Л. Е. Смирнов в работе [24] под генерализацией на аэроснимке понимал обобщение фотоизображения, распространяемое на контуры, тон и рисунок в целом. Далее механизм обобщения фотоизображения был перенесен им также на КФС [25, 26].

При теоретической оценке возможностей дешифрирования лесов по мелкомасштабным аэрофотоснимкам Л. М. Матия-

севич предложил некоторые условные критерии для расчета площадей, выделов и диаметра крон, которые возможно обнаружить с заданной вероятностью на аэрофотоснимке данного масштаба и обладающие определенной разрешающей способностью. Эти критерии характеризуют степень генерализации изображения на аэрофотоснимках [17].

В области геологического дешифрирования В. Д. Скарятиним использовалось понятие уровня генерализации, который принимался количественно пропорциональным знаменателю масштаба исходных КФС [21—23]. Аналогичный подход принят авторами статьи, посвященной гидрогеологическому дешифрированию, где говорится, что «КФС... обладают... генерализацией отображения природных объектов, соответствующей масштабам исследований» [20].

В. Н. Брюханов, В. К. Еремин и Б. Н. Можаяев [3] считают, что качественное изменение информации наблюдается при изменении масштаба изображения лишь в 3—5 раз. Выделяя всего четыре группы масштабов, авторы характеризуют каждый из них соответствующим уровнем генерализации. По существу ими ставится знак равенства между масштабом и генерализацией.

Приводится одна из возможных гипотез, объясняющих явление «просвечивания» глубинного строения на космических изображениях. Суть этой гипотезы заключается в том, что неоднородности глубоких горизонтов земной коры проявляются в ландшафте вследствие воздействия геохимических, гидрогеологических, тепловых и других глубинных процессов на большой территории. Чем глубже находится источник воздействия, тем на большей территории проявляется его влияние на оптические свойства ландшафта. Отсюда следует, что на мелкомасштабных космических изображениях упомянутый комплекс глубинных процессов, проявляющийся в разнородности оптических свойств ландшафта, отражается наилучшим образом по сравнению с крупномасштабными аэрофотоснимками. Авторы считают, что разнородности оптических свойств ландшафта «становятся заметными при естественной генерализации на снимках, полученных из космоса».

Предложенная гипотеза, по-видимому, правильно отражает в главных чертах частичную зависимость оптики ландшафта от глубинных процессов. Однако вопросы о том, что же такое естественная генерализация, как происходит интегрирование и выделение объективно существующих в природе оптических свойств тех или иных объектов, по-прежнему требуют своего решения.

Завершая краткий обзор работ, посвященных в какой-то степени генерализации изображения, можно выделить еще

две группы статей. В первой группе при оценке возможностей дешифрирования даются только ссылки на генерализацию изображения без каких-либо количественных оценок и также без объяснения самого явления [1, 18, 22, 27, 28].

Вторая группа статей содержит изложение подхода к генерализации с точки зрения фотографий или качества изображения. К ним относится например, работа [29], в которой процесс генерализации изображения сводится к выбору спектральных зон и некоторым фотографическим преобразованиям. В статье [7] предлагается оценивать генерализацию спектрами Фурье. В докладе [2] под оптической генерализацией подразумевают фильтрацию высокочастотных составляющих фотоизображения.

Можно отметить, что разные авторы вкладывают различный смысл в один и тот же термин. В большинстве случаев предложенные определения носят качественный характер (процесс объединения мелких элементов ландшафта в более крупные, обобщение фотоизображения контуров, тона и рисунка). Отдельные количественные характеристики только фиксируют определенную сторону явления (разрешение на местности для разных типов КФС). Наиболее полно с точки зрения количественных характеристик исследованы соотношения между масштабом КФС и возможностью выявления и дешифрирования каких-то объектов. Однако эти соотношения являются скорее следствием генерализации, чем количественными оценками. Этот вопрос достаточно детально исследован применительно к общегеографическим и геологическим видам дешифрирования различных космических изображений.

Общая точка зрения наблюдается в выводе о делении всех космических изображений на четыре основные группы [3—6, 9, 11, 13, 15, 21, 22]. Однако их границы оцениваются различно. Наиболее справедливым представляется разделение на группы по приведенным масштабам [9, 15], которые позволяют сравнивать между собой достаточно разнородные изображения по своим разрешениям. Такое сравнение показывает, что предлагаемые уровни генерализации отличаются друг от друга переменным шагом.

Имеются попытки количественно оценить возможности дешифрирования только одних линейных элементов по их протяженности на разных типах космических снимков [12, 15, 30]. Приведенными примерами, по-видимому, и ограничиваются случаи количественных оценок отдельных сторон генерализации космических изображений.

На первоначальном этапе развития космических методов изучения Земли качественного подхода к явлению генерализации с отдельными количественными характеристиками

было достаточно. Однако в настоящее время для повышения эффективности исследований с помощью космических методов необходимо синтезировать представления о разных сторонах изучаемого явления, сформировать его модель в целом и выразить количественно влияние факторов, определяющих генерализацию. Попытка введения количественных оценок уже была предпринята на V Всесоюзном съезде Географического общества СССР [8] и развита в последующих работах [10].

Исходя из вышезложенного, на современном уровне исследований явление генерализации изображения должно быть рассмотрено прежде всего в связи с природными и техническими факторами (рис. 15). К природным относятся отража-

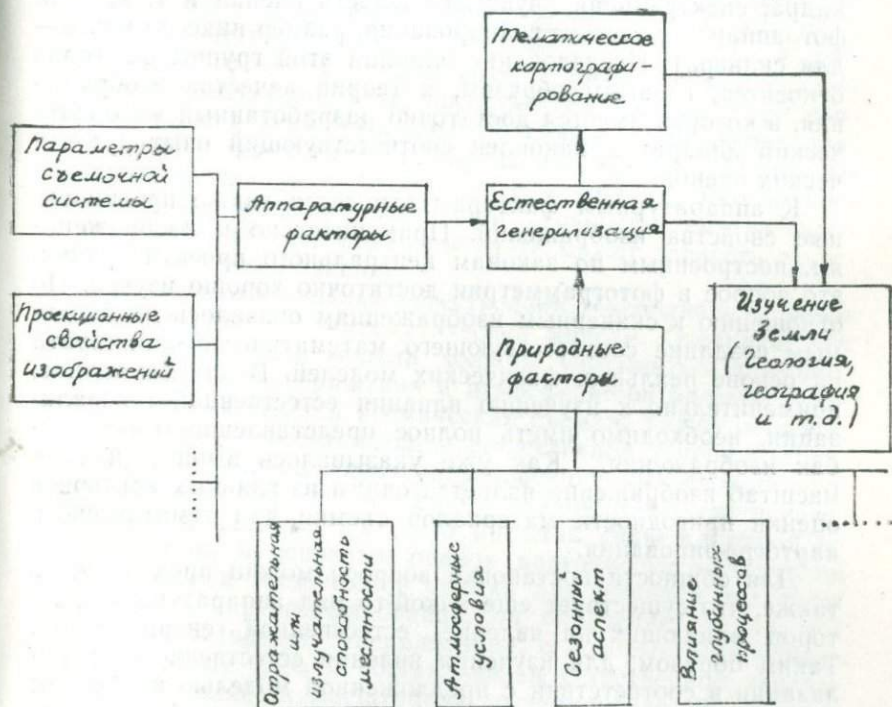


Рис. 15. Схема изучения явления естественной генерализации.

тельная или излучательная способность местности, атмосферные условия (или атмосферно-оптические, если речь идет о видимом и ИК участке спектра), влияние глубинных процессов, о чем уже говорилось выше и т. д. Если говорить о влиянии отражательной или излучательной способности элементов ландшафта, то в данном случае необходимо изучение этой способности не только как таковой. Не-

обходимо также и познание закономерностей формирования сигнала в том случае, когда в поле зрения прибора при наблюдении с больших высот попадает ряд объектов. Это обстоятельство определяет оптическую генерализацию, при которой происходит обобщение сигналов. Как показывает опыт, расчет средневзвешенного (пропорционально площади каждого объекта) при этом не отражает истинную картину оптических свойств изучаемой площади. Это обстоятельство учитывается, например, специальными уравнениями при измерении коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) системы растение-почва [19].

К аппаратурным факторам относятся, прежде всего, параметры съемочной системы (фокусное расстояние, размер кадра, спектральная чувствительность пленки и т. д.—для фотоаппарата; частота сканирования, размер пиксела и т. д.—для сканера). Исследование влияния этой группы факторов относится, главным образом, к теории качества изображения, в которой имеется достаточно разработанный математический аппарат и накоплен соответствующий опыт практических оценок.

К аппаратурным факторам относятся также проекционные свойства изображений. Применительно к изображениям, построенным по законам центрального проектирования, это вопрос в фотограмметрии достаточно хорошо изучен. По отношению к сканерным изображениям оказалось необходимым создание соответствующего математического аппарата на основе реальных физических моделей. В данном случае, применительно к изучению влияния естественной генерализации, необходимо иметь полное представление о масштабах изображения. Как уже указывалось выше, именно масштаб изображения является одним из главных критериев оценки пригодности материалов съемки для тематического картографирования.

Для общности постановки вопроса можно предположить также, что существует еще какой-то ряд аппаратурных факторов, влияющих на явление естественной генерализации. Таким образом, для изучения явления естественной генерализации в соответствии с предложенной моделью необходим синтез законов оптики ландшафта, оптики атмосферы и фотограмметрии при заданных природных и технических условиях космической съемки. В отдельных случаях знание закономерностей естественной генерализации необходимо для изучения Земли, минуя само тематическое картографирование.

Термин «генерализация», заимствованный из картографии, в данном случае отражает некоторую фильтрацию и обобщение информации на КФС. В этом смысле такая ана-

логия представляется оправданной, хотя между генерализацией в картографии и в фотографическом представлении Земли из космоса есть и существенное различие.

При космической фотосъемке или космической съемке каким-то сканирующим устройством фильтрация и обобщение информации происходят в силу определенных физических законов независимо от желания исследователя. В этом заключается существенное отличие генерализации на изображении от картографической генерализации. Поэтому правильнее в данном случае говорить о естественной генерализации, в отличие от картографической, закономерности которой формируются на основе умозрительных заключений.

Однако между обоими рассматриваемыми видами генерализации (картографической и естественной) есть одна общая и существенная черта. Помимо того, что в том и другом случае происходит обобщение и фильтрация информации, при естественной генерализации так же, как и при картографической, возможны дополнительные и, вероятно, значительные ошибки картографирования. Можно создать высокоточные способы фотограмметрической обработки космических изображений, но общая точность тематического картографирования в конечном итоге может зависеть от естественной генерализации.

Для изучения явления естественной генерализации необходимо создание ее математической модели. Очевидно, что при создании такой модели должны учитываться проекционные свойства изображения и атмосферно-оптические условия, в которых ведется космическая съемка. Таким образом, выделяются две составляющие естественной генерализации.

Одним из главных критериев проекционных свойств изображения является его масштаб в данной точке или некоторой области. Помимо того, что масштаб является одной из традиционных и основных оценок пригодности материалов воздушной или космической съемки для решения задач тематического картографирования, он определяет также все стороны естественной генерализации, о которых речь пойдет ниже. Поэтому первой составляющей естественной генерализации и является масштабная составляющая. В качестве второй может быть принята атмосферно-оптическая составляющая. Оптические свойства формирования изображения подразумевают использование определенного участка спектра. Поэтому вторая составляющая включает в себя в общем случае и зависимость естественной генерализации от области спектра.

В процессе формирования соответствующей математической модели были учтены прежде всего отдельные стороны изучаемого явления, использованные или предполагавшиеся

ранее некоторыми исследователями в чисто качественном смысле. Это, прежде всего, объединение мелких деталей в более крупные. Очевидно, что в общем случае это относится не только к растительности, формам рельефа и геологическим образованиям. Каждая деталь местности характеризуется пространственным размером и яркостью. Поэтому для общности следует говорить об изменении статистических свойств пространственных и яркостных характеристик изображений деталей местности при их регистрации в разных масштабах и с разных высот.

Известно, что при изменении статических свойств яркостных и пространственных характеристик изображений с уменьшением масштаба и увеличением высоты съемки будет наблюдаться ухудшение яркостного и пространственного разрешения. Поэтому следующей стороной естественной генерализации следует считать изменение обоих видов разрешения, рассматриваемое в качестве самостоятельной характеристики, широко используемой для оценки качества изображения [31]. Именно разрешение, особенно пространственное, будет влиять на обобщение контуров, которое рассматривалось некоторыми исследователями при изучении генерализации в чисто качественном плане. Учитывая важность этой характеристики — формы контуров — введем ее также в качестве одного из параметров явления естественной генерализации.

Ранее рассматривалось обобщение тона и рисунка в качественном отношении. Изменение тона на единицу расстояния, т. е. оптический градиент, дает возможность определять границу между изображениями различных объектов. В силу изложенного оптические градиенты также следует рассматривать как одну из сторон естественной генерализации. Что касается обобщения рисунка, то это определение не отличается четкостью формулировки и в данной модели не рассматривается.

На основании всего вышеизложенного можно сформулировать следующее определение: **естественная генерализация представляет собою изменение статистических свойств пространственных и яркостных характеристик изображений деталей местности при их регистрации в разных масштабах и с разных высот, сопровождающееся уменьшением пространственного и яркостного разрешения, изменением формы контуров и оптических градиентов на границе отобразившихся объектов.**

Можно говорить о влиянии только одного масштаба изображения на все явления в целом или на его отдельные стороны. Тогда в соответствии с принятой постановкой имеет место масштабная естественная генерализация. Аналогично

имеется атмосферная естественная генерализация. В природе существуют обе составляющие и задача состоит в анализе и синтезе этого явления. При решении этой задачи принимаются следующие концепции:

1. В случае фотографической регистрации предполагается, что все плотности изображения находятся на прямолинейном участке характеристической кривой.

2. Масштаб в произвольной точке и в заданном направлении определяется соответствующими уравнениями. Применительно к сканерным снимкам в зависимости от вида проектирования необходим вывод этих уравнений. Вопрос о масштабах изображения тесно связан с разрешением этих снимков на местности.

3. Влияние атмосферы на естественную генерализацию определяется не только ее рассеивающими свойствами. Для оценки этой стороны изучаемого явления необходимо создание достаточно общей модели оптических свойств атмосферы, учитывающей в том числе и влияние турбулентности.

Таковы основные концепции, положенные в основу создания модели естественной генерализации изображения на космических снимках. Принятые стороны естественной генерализации, по-видимому, не являются исчерпывающими, объясняющими полностью все достаточно сложное явление. Однако на первоначальном этапе количественного изучения этого явления указанные его стороны (с учетом изложенных выше трех основных концепций) являются достаточными для познания естественной генерализации. С учетом вышеизложенного и построено моделирование естественной генерализации космических снимков на ЭВМ.

Комплекс соответствующих программ предусматривает изменение выдержки при фотографировании вследствие дополнительного наложения рассеянной радиации таким образом, чтобы один из объектов местности с заданным коэффициентом яркости τ_0 сохранял постоянной оптическую плотность изображения (рис. 16). На рис. 19 показано изменение плотностей D в зависимости от коэффициента задымленности χ , который в свою очередь, является функцией семи параметров.

$$\chi = f(q_*, S_m, H, Z_{\odot}, A_{\odot}, \beta, q),$$

где q_* — общая оптическая толщина атмосферы,

S_m — метеорологические дальности видимости,

Z_{\odot} — зенитное расстояние Солнца, A_{\odot} — его азимут, β — угол наклона проектирующего луча по отношению к местной вертикали, q — альbedo местности.

Для τ_0 сохраняется условие $D(\tau_0) = \text{const}$. При $\tau_1 > \tau_0$ оптическая плотность $D(\tau_1)$ будет уменьшаться, при $\tau_2 < \tau_0$ оп-

тическая плотность D (r_2) увеличивается. Очевидно, что в этом случае уменьшенная разность оптических плотностей ΔD остается на прямолинейном участке характеристической кривой.

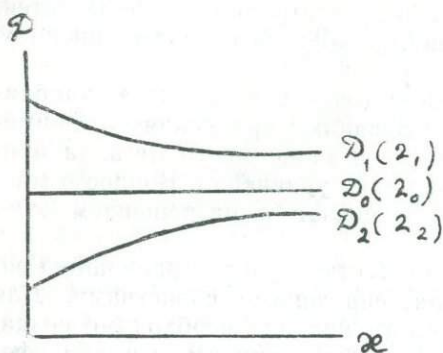


Рис. 16. Зависимость изменения плотности D от коэффициента задымленности x .

В сканерных системах изображение формируется путем последовательного наложения строк, которые в проекции на местности могут или частично перекрываться или иметь разрыв между собой. Аналогичным образом, пиксели (элементарные площадки сканирования), из которых формируется строка, также могут иметь между собой перекрытие или разрыв.

Перекрытие строк может определяться коэффициентом K_1 , а перекрытие пикселей — коэффициентом K_2 . Примем, что пиксел представляет собой эллипс с полуосями a и b . Далее введем понятие об эффективных размерах пиксела, представляющих собой полуоси K_2a и K_1b или K_1a и K_2b (в зависимости от расположения эллипса на строке сканирования; далее примем первый вариант). При этом условии масштаб $\frac{1}{m}$ в произвольном направлении φ , которое отсчитывается на снимке относительно оси χ (ось χ совпадает с направлением строк сканирования), может быть представлен уравнением:

$$\frac{1}{m} = \frac{ab \sqrt{K_2^2 A^2 \sin^2 \varphi + K_1^2 B^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma}}{K_1 K_2 AB \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + B^2 \cos^2 \varphi} \cdot \sqrt{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma}} \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{H+R}{f \cos \beta \cos \Theta} a = \frac{H+R}{\cos \beta \cos \Theta} \Delta \beta_1; \\ B &= \frac{H+R}{f \cos \beta} b = \frac{H+R}{\cos \beta} \Delta \beta_2; \\ \Theta &= \arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R} \right) \sin \beta \right] - \beta; \\ \gamma &= \Theta + \beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь приняты дополнительные обозначения: f — условное фокусное расстояние, $\Delta\beta_1$ и $\Delta\beta_2$ — узловые разрешения снимка, R — радиус Земли, Q — геоцентрический угол, определяющий местоположение данной точки на земной поверхности [15].

Для иллюстрации на рис. 20 показано изменение минимальных и максимальных масштабов условного сканерного снимка при условии, что $H=250$ км, $\Delta\beta_1=0.07$, $\Delta\beta_2=0.05$, $K_1=0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$. Расчеты выполнены по специальной программе «Масштаб-2».

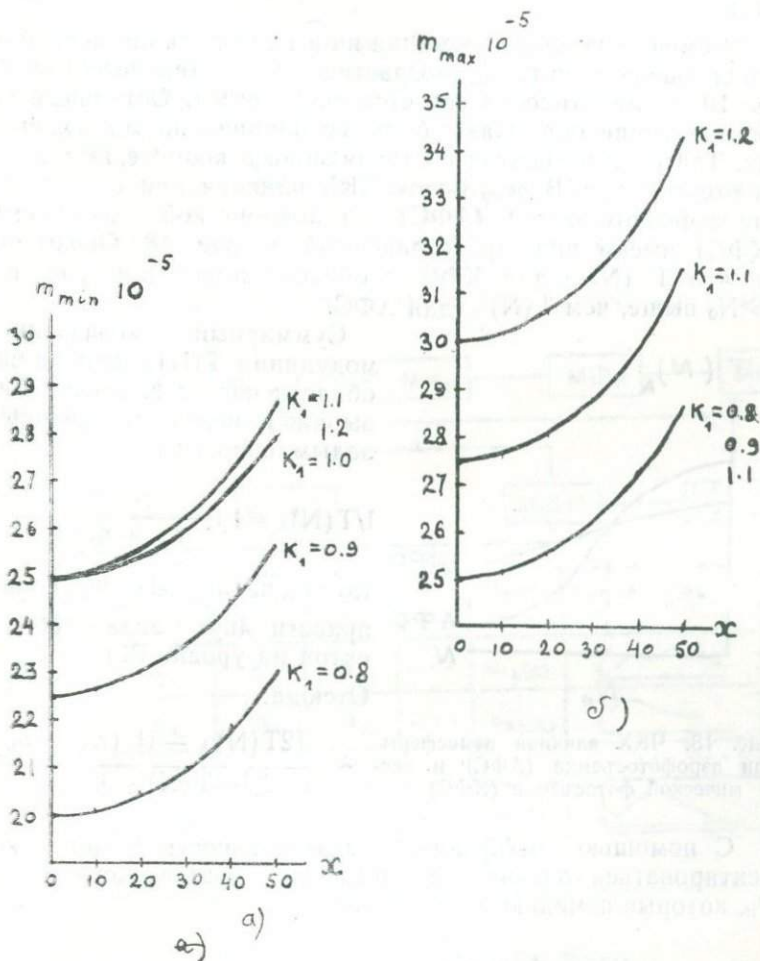


Рис. 17. Минимальные (а) и максимальные (б) масштабы условного сканерного снимка при $H=250$ км, $\Delta\beta_1=0,07$, $\Delta\beta_2=0,05$, $K=0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2$.

Модель влияния атмосферы включает следующие составляющие:

- рассеяние слоя атмосферы, находящегося между земной поверхностью и приемником;
- внутреннее светорассеяние, обусловленное слоем атмосферы, в котором находится приемник;
- турбулентное перемешивание приземного слоя атмосферы;
- аэродинамическое турбулентное перемешивание атмосферы, в котором происходит перемещение носителя приемника.

По мере подъема приемника на высоту влияния первой составляющей монотонно возрастает, хотя при высотах более 10 км практически остается постоянным. Остальные три составляющие оказывают большее влияние на малых высотах. Третья и четвертая составляющие в космосе практически отсутствуют. В результате ЧКХ влияния атмосферы $T(N)_A$ для аэрофотосъемки (АФС) и космической фотосъемки (КФС) имеют вид, представленный на рис. 18. Оказывается, что $T(N)_A$ для КФС в области высоких частот при $N > N_0$ выше, чем $T(N)_A$ для АФС.

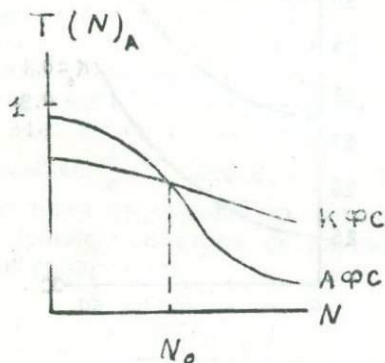


Рис. 18. ЧКХ влияния атмосферы при аэрофотосъемке (АФС) и космической фотосъемке (КФС).

Суммарный коэффициент модуляции $T(N)_A$ для данной области частот N может быть выражен через коэффициент задымленности χ

$$1/T(N)_A = 1 + \frac{\gamma_{O_1} + \gamma_{O_2}}{\gamma_{O_1} + \gamma_{O_2} + 2\chi} \quad (4)$$

где γ_{O_1} и γ_{O_2} — коэффициенты яркости двух заданных объектов на уровне Земли.

Отсюда:

$$\chi = \frac{[2T(N)_A - 1] (\gamma_{O_1} + \gamma_{O_2})}{2[1 - T(N)_A]} \quad (5)$$

С помощью коэффициента задымленности χ могут корректироваться оптические плотности космического снимка D_H , которые изменяются по закону

$$D_H = \gamma \lg \left(\eta \mu_H \Gamma \frac{1}{H} \right), \quad (6)$$

где γ — коэффициент контрастности фотопленки;
 $\mu_H \eta$ — экспонетрические коэффициенты;

Γ_n^1 — коэффициент яркости данного объекта с учетом влияния атмосферы.

Для μ_n и ξ имеем

$$\left. \begin{aligned} \mu_n &= \frac{1}{\Gamma_0} 10 \frac{D_0}{\xi} \\ \eta &= \Gamma_0 \frac{1+\chi}{\Gamma_0+\chi} \end{aligned} \right\} (7)$$

Первый из них отражает экспонетрию на уровне Земли, когда объект с коэффициентом яркости Γ_0 приобретает плотность D_0 . Второй коэффициент показывает, во сколько раз должна меняться выдержка, чтобы соблюдалось условие $D(\Gamma_0) = \text{const}$ (рис. 2).

Таковы некоторые главные математические уравнения, положенные в соответствии с принятыми концепциями в основу моделирования естественной генерализации на ЭВМ.

Наиболее полно отражает различные свойства изучаемого явления задача «Сито» (рис. 19). В качестве исходных

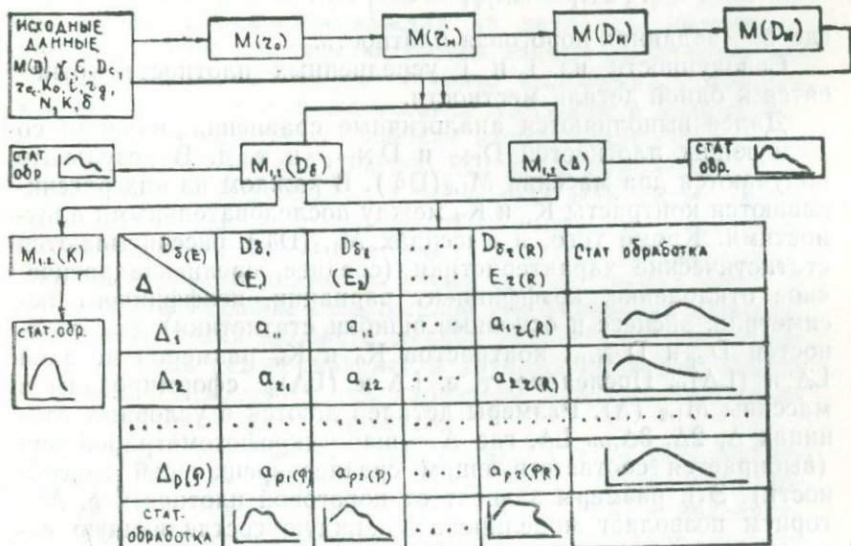


Рис. 19. Схема решения задачи «Сито».

данных используется массив оптических плотностей $M(D)$, полученный, например, на микрофотометре. Плотности D пересчитываются в массив исходных коэффициентов ярко-

стей $M(r_0)$, которые затем редуцируются таким образом, чтобы исключить влияние атмосферы. В результате получается массив $M(r'_n)$, который затем пересчитывается в соответствующие плотности $M(D_n)$. Таким образом, моделируется влияние атмосферы. Редуцирование выполняется по формуле:

$$r'_n = r_0 t^1 + r^1 g \quad (8)$$

где $t^1, r^1 g$ — компоненты передаточной характеристики атмосферы [15].

Далее моделируется влияние изменения масштаба. Для этого массива $M(D_n)$ сглаживается скользящим средним N со сдвигом K , в результате получается массив $M(D_{N_1})$.

В массивах $M(D)$ и $M(D_{N_1})$ последовательно сравниваются D_i и D_{N_1} со всеми последующими значениями. При этом находятся также плотности D_{i+1} и $D_{N_{j+1}}$. ($i=1, 2, 3, \dots, j=1, 2, 3, \dots$), для которых

$$\left. \begin{aligned} |D_i - D_{i+1}| &\leq \delta \\ |D_{N_1} - D_{N_{j+1}}| &\leq \delta \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где δ — заданная пороговая плотность.

Совокупности из i и j усредненных плотностей относятся к одной детали местности.

Далее выполняются аналогичные сравнения, начиная со следующих плотностей D_{i+2} и $D_{N_{j+2}}$ и т. д. В результате получаются два массива $M_{1,2}(D\delta)$. В каждом из них рассчитываются контрасты K_0 и K_n между последовательными плотностями. Кроме того, в массивах $M_{1,2}(D\delta)$ рассчитываются статистические характеристики (среднее, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, эксцесс и основные ошибки статистики) для плотностей D_{cp} и $D_{N_{cp}}$, контрастов K_0 и K_n размеров деталей $L\Delta$ и $(L\Delta)_n$. Последние, т. е. $L\Delta$ и $(L\Delta)_n$ сформированы в массивы $M_{1,2}(\Delta)$. Размеры деталей даются в условных единицах $\Delta, 2\Delta, 3\Delta, \dots, L\Delta$, где Δ — шаг микрофотометрирования (выбирается соответствующим среднеразрешающей способности). Эти размеры зависят от пороговой плотности δ . Алгоритм позволяет моделировать каждую составляющую естественной генерализации как порознь, так и совместно, в зависимости от $N, K, t^1, r^1 g$ (табл. 9).

В результате составляются две таблицы для массивов $M_{1,2}(D\delta)$ с расположением по строкам деталей размером $\Delta_i(j)$, а по столбцам — плотностей $D\delta_{i(1)}$. Для каждой строки или столбца также проводится статистическая обработка.

Зависимость составляющих естественной генерализации от параметров t^1 , rg^1 , N , K

Составляющие естественной генерализации	t^1	rg^1	N	K
Масштабная	1	0	>1	$N > K \gg 1$
Атмосферная	<1	>0	1	1
Масштабная плюс атмосферная	<1	>0	>1	$N > K \gg 1$

Таким образом, программа «Сито»² позволяет определять почти все стороны естественной генерализации, положенные в основу предложенной выше модели, за исключением формы контуров и оптических градиентов. При этом количественно оценивается каждая из двух составляющих. Примером может служить обработка данных подспутникового эксперимента, во время которого выполнялась аэрофотосъемка одного и того же участка местности с разных высот. Объектом обработки служат изображения солончака масштабов 1 : 10 000 и 1 : 100 000. На крупномасштабном аэрофотоснимке относительная доля мелких деталей условного размера $\Delta=1$ (шаг микрофотометрирования) составляет 89% (при пороговом значении плотности $\delta=0.02$). На мелкомасштабном аэрофотоснимке получено соответственно 63%. В данном случае явление естественной генерализации проявляется в уменьшении процента мелких деталей, благодаря чему повышается дешифрируемость крупных объектов. По-видимому, эта закономерность характера для мелкомасштабных изображений многих объектов.

Моделирование уменьшения масштаба в 10 раз, выполненное по данным микрофотометрирования крупномасштабного аэрофотоснимка, дало соответственно 70%, а моделирование атмосферы — 87%. Совместное моделирование привело к 67%, что близко к 63%, полученным по реальному мелкомасштабному аэрофотоснимку. Следовательно, масштабная составляющая изменения процента мелких деталей преобладает над атмосферной составляющей примерно в 5—5,5 раз,

² Программа «Сито» для ЭВМ ЕС-1020 на Фортране написана П. В. Степановым.

если 89%—67% принять за единицу. При оценке изменения среднего контраста изображения этих двух масштабов было установлено, что влияние атмосферы приблизительно выше в 2.5 раза по сравнению с изменением только одного масштаба без влияния атмосферы. Измерение только одного масштаба привело к падению контраста с 0.171 до 0.129, а влияние только атмосферы — с 0.171 до 0.069.

Закономерность уменьшения процента мелких деталей ($\Delta=1$) на более генерализованных изображениях подтверждается также обработкой многозональных космических фотоснимков, выполненных камерой МКФ-6 с ПКК «Союз-22», на Ферганскую долину. На рис. 23 показаны графики изменения процента мелких деталей в зависимости от пороговой плотности δ и уменьшения масштаба N (при $K=1$) для каждого из каналов камеры МКФ-6. Если в качестве пороговой плотности взять $\delta=0.1D_{\text{ср}}$, то получаем табл. 10, в которой даны проценты мелких деталей $\Delta=1$ для исходного масштаба изображений ($N=1$) и масштабов, уменьшенных в 2, 3 и 4 раза ($N=2, 3, 4$).

Таблица 10

Процент мелких деталей на космических фотоснимках разных масштабов для разных каналов при съемке долины камерой МКФ-6

№ канала	1	2	3	4	5	6
% $\Delta=1$ при $N=1$	30	20	32	42	14	20
% $\Delta=1$ при $N=2$	21	13	26	26	3	1
% $\Delta=1$ при $N=3$	19	9	19	26	0	2
% $\Delta=1$ при $N=4$	13	3	19	22	0	0

Следует отметить, что для моделирования других сторон естественной генерализации служит ряд иных программ. Комплекс подобных программ позволяет полностью моделировать изучаемое явление и решать ряд практических задач. По-видимому, нет необходимости перечислять многие практические задачи, где необходимо привлечение данных по естественной генерализации. Но две из них представля-

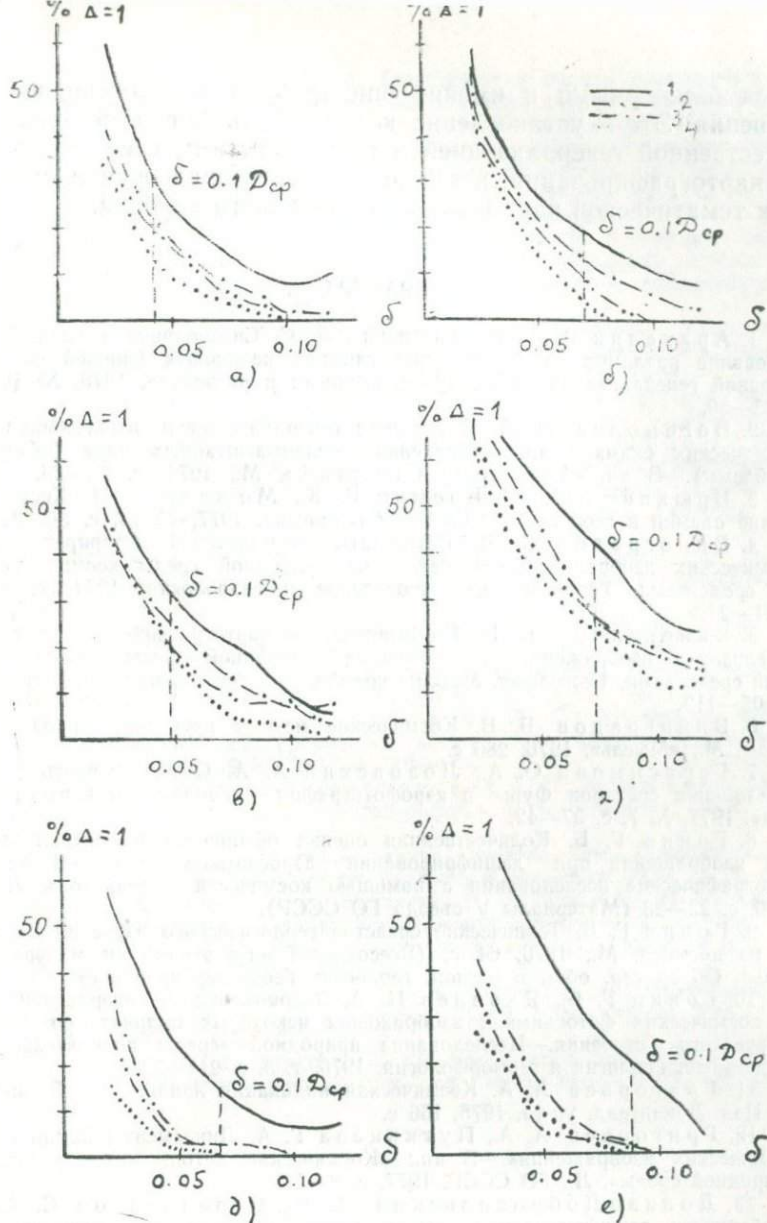


Рис. 20. Процент мелких деталей ($\Delta=1$) на многозональных космических фотоснимках Ферганской долины, полученных камерой МКФ-6 с ПКК «Союз-22», в зависимости от пороговой плотности.

- а) — 1 канал, г) — 4 канал,
 б) — 2 канал, д) — 5 канал,
 в) — 3 канал, е) — 6 канал.

- 1 — исходный масштаб 1 : 2500000 ($N=1$)
 2 — уменьшенный масштаб 1 : 5000000 ($N=2$)
 3 — уменьшенный масштаб 1 : 7500000 ($N=3$)
 4 — уменьшенный масштаб 1 : 10000000 ($N=4$)

ются бесспорными и именно они требуют первоочередного решения. Это — установление количественных связей между естественной генерализацией и возможностями тематического картографирования, а также количественная оценка ошибок тематической карты, зависящих от этого явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аракелян Р. А., Караханян А. С. Спознавание и дешифрирование разломов на космических снимках различных уровней естественной генерализации. «Изв. вузов, геология и разведка», 1978, № 10, с. 35—39.
2. Богомолов Л. А. Оптическая генерализация и использование космических снимков для обновления мелкомасштабных карт (обзор проблемы).—В кн. «Аэрометоды в географии», М., 1974, с. 24—26.
3. Брюханов В. Н., Еремин В. К., Можаяев Б. Н. Космические съемки в геологии.—«Советская геология», 1977, № 11, с. 86—94.
4. Виноградов Б. В. Результаты комплексной интерпретации космических изображений.—Исследование природной среды космическими средствами. Геоботаника, почвоведение и гидрология, 1974, т. 3, с. 11—21.
5. Виноградов Б. В. Геоботаническое картографирование и генерализация изображения.—Исследование природной среды космическими средствами. География. Методы космической фотосъемки, 1975, т. 4, с. 105—113.
6. Виноградов Б. В. Космические методы изучения природной среды. М., «Мысль», 1976. 286 с.
7. Герасимова О. А., Лозовский А. А. О возможности использования спектров Фурье в аэрофотографии.—«Геодезия и картография», 1977, № 7, с. 37—42.
8. Гонин Г. Б. Количественная оценка обзорности и генерализации изображения при дешифрировании аэроснимков Земли.—В кн.: «Географические исследования с помощью космических аппаратов». Л., 1970, с. 22—23 (Материалы V съезда ГО СССР).
9. Гонин Г. Б. Технические средства геологического изучения Земли из космоса. М., 1976, 64 с. (Всесоюзный ин-т экономики минерал. сырья. Обзор сер. общ. и регион. геологии; Геол. картирование).
10. Гонин Г. Б., Яковлев Н. А. Закономерности генерализации на космических фотоснимках изображения некоторых индикаторов геологического строения.—Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология, 1976, т. 5, с. 211—221.
11. Григорьев А. А. Космическая индикация ландшафтов Земли. Л., Изд. Ленинград. ун-та, 1975, 166 с.
12. Григорьев А. А., Путинцева Г. А. Линеаменты Земли на космических изображениях.—В кн.: «Космические методы исследований природной среды». Л., ГО СССР, 1977, с. 8—21.
13. Доливо-Добровольский А. В., Стрельников С. И. Особенности дешифрирования геологических объектов по космическим снимкам.—В кн.: «Применение новых видов аэросъемок при геологических исследованиях». Л., 1976, с. 5—11.
14. Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Ред. К. Я. Кондратьев. Л., Гидрометеониздат, 1972. 400 с.
15. Космические фотосъемки и геологические исследования. Ред. Г. Б. Гонин и С. И. Стрельников. Л., «Недра», 1975. 416 с.
16. Кравцова В. И. Космическое картографирование. М., Изд. МГУ, 1977. 168 с.

17. Матиясевич Л. М. Теоретическая оценка возможностей дешифрирования лесов по мелкомасштабным аэрофотоснимкам.—Сборн. науч. трудов Ленингр. науч. исслед. ин-та Лесного хоз-ва, 1975, вып. 22.

18. Некоторые вопросы методики использования космических снимков по результатам работ на комплексных геологических полигонах). «Изв. вузов. Геология и разведка», 1978, № 10, с. 80—83. Авт.: С. М. Богородский, В. В. Буклин, В. А. Козлов, Л. И. Соловьева.

19. Рачкулик В. И. Ситникова М. В. Некоторые вопросы определения с самолетов и спутников биомассы пустынных пастбищ и посевов сельскохозяйственных культур.—«Метеорология и гидрология», 1976, № 6, с. 82—91.

20. Садов А. В., Бурлешин М. И. О проверке гидрогеологической информации, получаемой по материалам космической съемки.—«Изв. вузов. Геология и разведка», 1978, № 10, с. 115—120.

21. Скарятин В. Д. Об изучении разрывной тектоники по комплексу разномасштабных космоснимков Земли (метод многоступенчатой генерализации).—«Изв. вузов. Геология и разведка», 1973, № 7, с. 34—50.

22. Скарятин В. Д. Применение метода многоступенчатой генерализации при изучении геологических структур разного масштаба. Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология, 1976, т. 5, с. 123—141.

23. Скарятин В. Д. Фотогеологические методы при изучении нефтегазоносных территорий. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1978, № 10, с. 181—182.

24. Смирнов Л. Е. Генерализация при дешифрировании аэро-снимков. — «Вестн. Ленингр. ун-та», 1965, № 8, с. 97—106.

25. Смирнов Л. Е. Аэрокосмические методы географических исследований. Л., изд-во ЛГУ, 1975. 303 с.

26. Смирнов Л. Е., Грищенко А. С. Некоторые проблемы географического дешифрирования космических снимков Земли.—«Вестн. Ленингр. ун-та», 1968, № 24, с. 110—115.

27. Соколов Р. И., Марковский А. П., Музылев С. А. Отечественная геологическая картография.—«Сов. геология», 1977, № 11, с. 23—30.

28. Состояние и основные задачи развития аэро- и космических методов в геологии.—«Изв. вузов. Геология и разведка», 1978, № 10, с. 3—8. Авт.: В. К. Еремин, В. Н. Брюханов, Г. В. Махин, В. Н. Можяев.

29. Adams F. Landsat MSS imagery—a thematic mapping base.— „Proc. Amer. Congr. Surv. and Mapp. Fall. Conv. Seatte, Wash., 1976“.

30. Moore G. K., Holliday E. F. Discovery and significance of the Beech Grove lineament of Tennessee.— “Geol. Surv. Profess. Pap.”, Wash., 1976, № 929, p. 164—168.

31. Welch R. Progress in the Specification and analysis of image quality.— “Photogrammetr. Engng. and Remote Sens.”, 1977, vol. 43, № 6 p. 709—719.

СОДЕРЖАНИЕ

В. В. Куприянов, В. Г. Прокачева, В. Ф. Усачев. Спутниковая информация в решении задач гидрологии суши	3
А. В. Бушуев. Аэрокосмические методы исследования ледяного покрова морей	17
К. Я. Кондратьев. Роль космических средств наблюдений в исследованиях климата	37
Л. С. Минина. Спутниковая информация в метеорологии	65
Е. А. Востокова, Ю. Г. Кельнер. Принципы системного картографирования природных ресурсов и их охраны по космическим фотоснимкам	77
А. А. Григорьев. Города и окружающая среда: состояние и проблемы космического мониторинга	91
Е. А. Галкина, В. Н. Кирюшкин, В. К. Константинов, В. П. Ми-рошниченко. Аэрокосмические методы исследования природной среды (на примере болот)	106
Б. В. Шилин. Тепловая аэросъемка при исследовании природных ресурсов в СССР	121
Г. Б. Гонин. Естественная генерализация космических снимков	132

УДК 556.02 : 629.13

Спутниковая информация в решении задач гидрологии суши. Куприянов В. В., Прокачева В. Г., Усачев В. Ф.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст., Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 3.

Применительно к решению задач оперативной гидрологии рассмотрены основные направления использования спутниковой информации:

— картирование снежного покрова, оценка его динамики, получение зависимости для определения водозапаса и расчетов весеннего половодья;

— изучение снежного покрова как индикатора для определения зон влияния урбанизации на окружающую среду;

— оценка ледовой обстановки на озерах и водохранилищах;

— изучение разливов рек, озер, затопления пойм, водного баланса внутренних водоемов;

— подходы к расчетам и моделированию процессов стока.

Обзор выполнен по отечественным материалам, основанным на съемках с ИСЗ «Метеор».

УДК 551.326.022

Аэрокосмические методы исследования ледяного покрова морей. Бушуев А. В.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст., Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 17.

Сформулированы требования к средствам сбора ледовой информации. Рассмотрена возможность применения различных дистанционных средств для определения характеристик ледяного покрова и оптимальный состав измерительных комплексов. Сделан вывод о том, что уровень разработки дистанционных средств зондирования ледяного покрова и методов обработки данных позволит уже в настоящее время полностью перейти на инструментальные методы ледовых наблюдений.

УДК 551.58

Роль космических средств наблюдений в исследованиях климата. Кондратьев К. Я.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст., Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 37.

Обсуждены требования к данным наблюдениям за климатом и его изменениями, а также такими параметрами суши, океанов, криосферы и атмосферы, которые определяют современные изменения климата. Рассмотрены возможности наблюдений за глобальным климатом и его изменениями при помощи ИСЗ и орбитальных станций как наиболее перспективных средств наблюдений. Описаны планы развития системы опутникового глобального мониторинга климата, осуществляемые в США.

Спутниковая информация и метеорология. Минина Л. С.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст. Л., ГО СССР, 1980, с. 65.

Рассмотрены новые данные об атмосферных процессах, полученные с помощью спутниковой информации. Съемки из космоса подтвердили все основные положения фронтологического анализа и барической синоптики. Обнаружена исключительно высокая степень организации облачного покрова и некоторых ранее неизвестных особенностей ее структуры. Показано, что спутниковый нефанализ, выявляющий особенности воздушных течений разного масштаба, позволит познавать закономерности циркуляции атмосферы всей планеты и главным образом наименее изученной ее части — тропической зоны. Указываются перспективы развития спутниковой метеорологии.

Принципы системного картографирования природных ресурсов и их охраны по космическим фотоснимкам. Востокова Е. А., Кельнер Ю. Г.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст. Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 77.

Основными принципами системного картографирования являются: 1) составление взаимосвязанных систем или серий тематических карт, отражающих природные условия, современное состояние земель, величину антропогенного воздействия и рекомендуемые мероприятия по охране и рациональному использованию природных ресурсов; составление базовых карт для всех регионов и частных карт, специфичных для определенных районов; 2) взаимосвязанность карт серий, основанная на ландшафтном методе дешифрирования космических фотоснимков и коллегиальности составления тематических карт; 3) этапность и последовательность работ по составлению исходных оригиналов тематических карт, их проверки и согласования. Реализация такого системного картографирования как отдельных регионов, так и на страну в целом, возможно только на основе широкого межведомственного сотрудничества на базе использования космической фотоинформации. В настоящее время проведены первые эксперименты и опытно-производственные работы по составлению серий космотематических карт Госцентром «Природа» совместно с научными и производственными организациями министерств и ведомств, Академии наук СССР и союзных республик на отдельные районы Средней Азии, Нечерноземья, Белоруссии, Прибайкалья и Забайкалья.

Развертывание работ по системному картографированию с использованием материалов космических фотосъемок является важной общегосударственной задачей, выполнение которой создаст надежную основу планированию рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Города и окружающая среда: состояние и проблемы космического мониторинга. Григорьев А. А. — Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст. Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 91.

На основе анализа современных тенденций развития урбанизации и процессов взаимодействия города с окружающей средой делается вывод о необходимости постоянного контроля за функционированием городов. Указывается, что наиболее эффективный мониторинг за взаимодействием городов и природной среды может быть осуществлен с помощью космических и дистанционных наблюдений. Дистанционный мониторинг взаи-

модействия городов и среды включает: обнаружение особенностей проявления этих взаимодействий; выявление их пространственно-временной структуры; картирование. Полученные данные могут быть использованы для прогноза проявления этих взаимодействий. Рассматриваются некоторые примеры. Обсуждаются возможные направления использования данных космической съемки для целей градостроительства. Указаны области их применения. Анализируются некоторые проблемы развития дистанционных методов изучения городов и окружающей среды.

УДК 528.711.1

Аэрокосмические методы исследования природной среды (на примере болот). Галкина Е. А., Кирюшкин В. Н., Константинов В. К., Мирошниченко В. П.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст. Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 106.

Природная среда — многофакторное образование с огромным диапазоном прямых и обратных связей, проявляющихся в единой энергетической, непрерывно развивающейся системе.

На современном этапе существенную роль для ее изучения и понимания приобретают дистанционные методы исследований и в первую очередь использование материалов аэро- и космических съемок.

Рассматриваются вопросы целостности природной среды (географической оболочки Земли) с точки зрения теории и практики дешифрирования аэро- и космических снимков; разработки методики дистанционных исследований, выбора оптимального времени проведения наблюдений, съемок и аппаратуры, а также применения аэрокосмических методов изучения болотных массивов в связи с их хозяйственным освоением и охраной природы.

УДК 556.01

Тепловая аэросъемка при исследовании природных ресурсов в СССР. Шилин Б. В.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст., Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 121.

Рассматривается состояние разработок в области техники, теории и методики тепловой аэросъемки при изучении природных ресурсов в СССР. Приводятся технические характеристики отечественного двухспектрального тепловизора «Вулкан», основные результаты разработки теплоинерционной модели формирования температурного поля, конкретные примеры применения тепловой аэросъемки при поисках термальных вод, решении задач гидрологии, гидрогеологии, изучения и охране водной среды и т. д. Подчеркивается, что сложная динамика температурного поля требует для решения любых задач проведения многократных съемок и совместной интерпретации полученных изображений теплового поля (тепловых аэроснимков).

УДК 528.91 : 629.78

Естественная генерализация космических снимков. Гонин Г. Б.—Аэрокосмические методы исследования окружающей среды. Сб. ст. Л., изд. ГО СССР, 1980, с. 132.

Обсуждаются различные виды генерализации космических снимков: тематические, спектральные, геометрические. Подчеркивается, что явление генерализации всегда должно рассматриваться в связи с природными и техническими факторами съемки. Анализируются концепции, которые могут быть положены в основу создания модели естественной генерализации изображения. Рассматриваются вопросы моделирования естественной генерализации снимков на ЭВМ.

**Аэрокосмические методы в исследовании
окружающей среды**

Редактор **Л. С. Милосердная**

Географическое общество СССР. 190000, Ленинград, пер. Гривцова, 10.

Сдано в набор 13.05.80 г. Подписано в печать 28.08.80 Горл. № М-29775
Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературн.
Печать высокая. Печатных листов 9³/₄. Уч.-изд. л. 10,25. Тираж 1000 экз.
Заказ. № 3565. Цена 1 р. 20 к.

Межвузовская типография (1) СППО-2
Управления издательств, полиграфии
и книжной торговли Ленгорисполкома
193036, Ленинград, Московский вокзал, I платформа

Цена 1 руб. 20 коп.

3760