

О.М. Покровский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

Проанализированы основные объекты космических исследований при решении экологических задач. Систематизированы требования потребителей космической информации для основных групп прикладных народнохозяйственных задач. Проведено сопоставление таких требований с характеристиками существующей аппаратуры метеорологических и природноресурсных спутников. Оптимизация по критерию максимума информативности позволяет выделить наборы спектральных каналов зондирования в интересах четырех групп задач: океанология, гидрология, геология, лесное и сельское хозяйство. Представлена математическая экономическая модель, позволяющая дифференцировать спектральные каналы зондирования по степени их экономической эффективности.

В последние годы интенсивно ведутся разработки бортовых измерительных комплексов (БИК), которые апробируются в ходе многочисленных космических экспериментов. Космическая информация широко используется для решения различных прикладных задач. Однако до сих пор остается открытым вопрос о степени соответствия получаемой КИ требованиям, предъявляемым пользователями в различных отраслях народного хозяйства. В данной статье представлен анализ по основным характеристикам БИК. Обсуждаются методы оптимизации ряда информационных и экономических характеристик БИК.

1. Объекты исследований

Общая структура исследований, связанных с использованием КИ, представлена на рис. 1. Две основные группы исследований — глобальные круговороты и геофизические процессы — входят в решение большинства экологических задач. Среди глобальных круговоротов главную роль играют энергетический и гидрологический циклы, а также совокупность биогеохимических циклов. Последние включают, в частности, круговороты углерода, азота и других веществ, которые к настоящему времени еще недостаточно исследованы. Другое направление глобальных экологических исследований — геофизические процессы в океане, на суше и в атмосфере. Упомянутые научные проблемы связаны с рядом наук о Земле (геология, океанология, гидрология, климатология) и с отраслями народного хозяйства (лесное и сельское хозяйство).

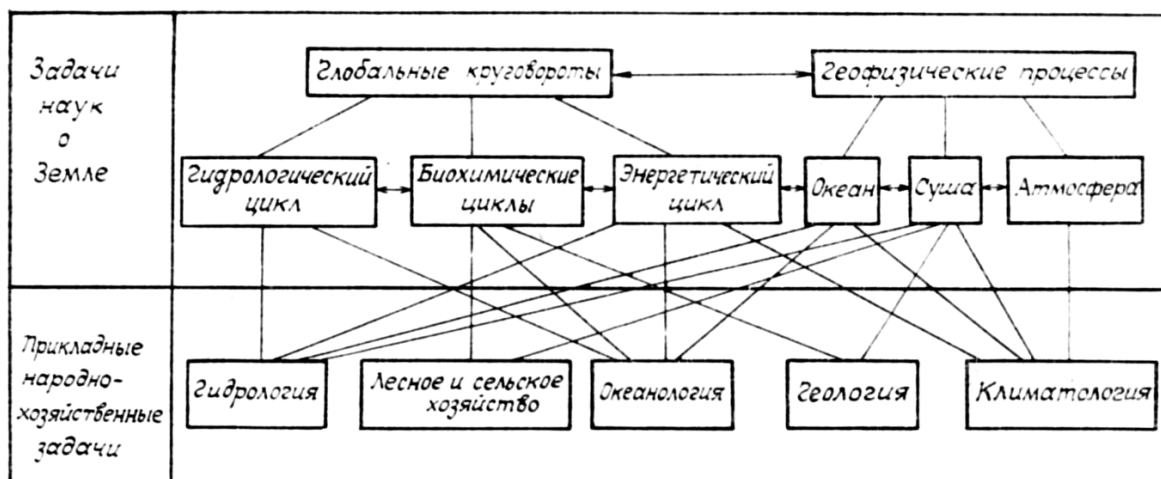


Рис. 1. Структура экологических исследований, проводимых с использованием КИ

2. Требования потребителей КИ

В большинстве случаев потребители КИ могут достаточно четко сформулировать требования к основным характеристикам информации (спектральные каналы, геометрия эксперимента, пространственно-временное разрешение и т.п.). В обсуждаемых ниже исследованиях нами использовалась сводка таких требований, представленная в [1] и относящаяся к четырем группам народнохозяйственных задач:

I — океанология (102 требования), II — гидрология (33), III — геология (36), IV — лесное и сельское хозяйство (32). Табл. 1 иллюстрирует примеры требований для нескольких важных народнохозяйственных задач в каждой из названных групп. Разнообразие таких требований выдвигает вопрос о выборе оптимальных условий проведения эксперимента, наилучшим образом обеспечивающего всю совокупность народнохозяйственных задач.

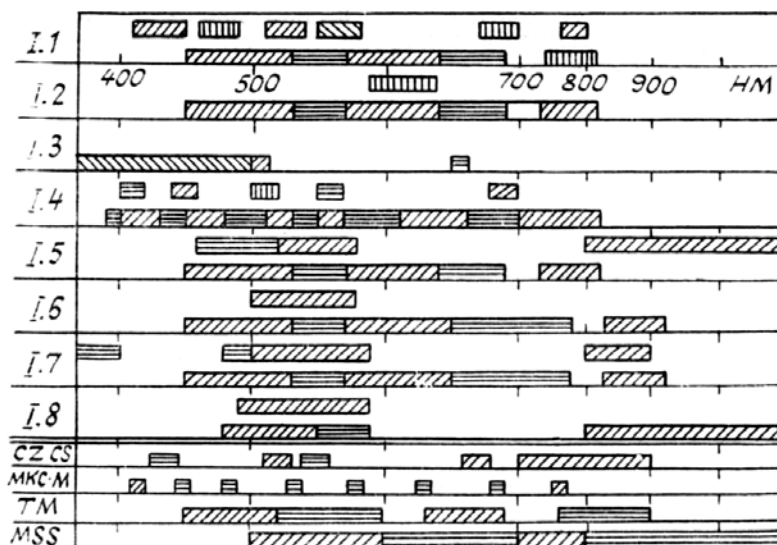


Рис. 2. Распределение требований группы задач «океанология» по отношению к выбору спектральных каналов зондирования в оптическом и ближнем ИК-диапазонах

Различие в требованиях относится прежде всего к выбору спектральных каналов зондирования. В верхней части рис. 2, 3 представлено разнообразие положений и ширин требуемых спектральных интервалов в оптическом и близком ИК-диапазоне. Шкала длин волн дана в верхней части рисунков. Индексация задач соответствует перечню табл. 1. В нижней части указанных рисунков даны спектральные характеристики действующей многозональной аппаратуры дистанционного зондирования. Сопоставление верхних и нижних частей рис. 2, 3 демонстрирует неоптимальность существующей аппаратуры и подводит к постановке задач оптимального планирования параметров измерительной аппаратуры дистанционного зондирования. В табл. 2 приведены требования к измерительным активно-пассивным системам СВЧ-диапазона, предназначенным для решения ряда народнохозяйственных задач, которые относятся к упомянутым выше группам I–IV. Границы спектральных поддиапазонов указаны в табл. 3.

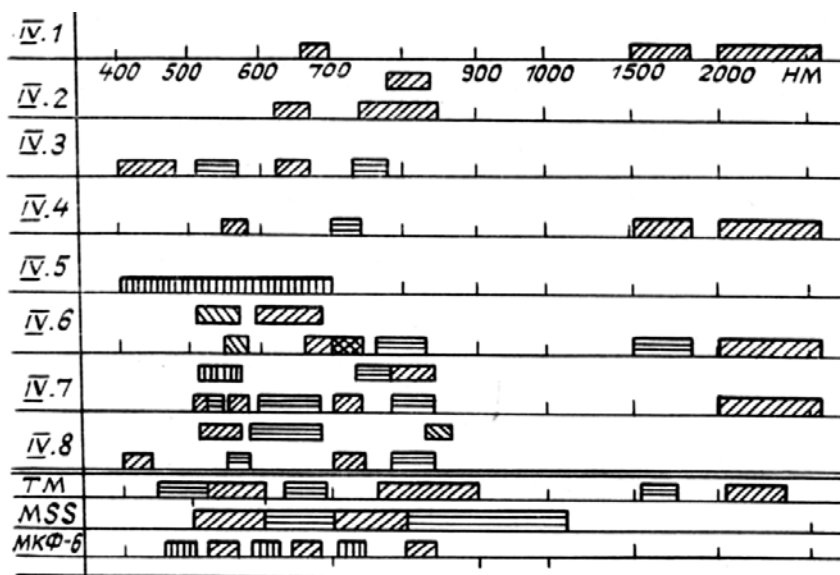


Рис. 3. Распределение требований группы задач «лесное и сельское хозяйство» по отношению к выбору спектральных каналов зондирования в оптическом и ближнем ИК-диапазонах

Требования к оптическим системам дистанционного зондирования

Группы н/х задач	Разрешение (м)	Углы визирования	Ширина полосы захвата (км)	Спектральные интервалы, мкм			
				Видимая область	Ближний ИК	ИК	
1	2	3	4	5	6	7	
I Океанология:							
1. Картирование прибрежных течений и приливов	60—90	45—60	200	0,41—0,44; 0,51—0,53; 0,57—0,64; 0,68—0,70	0,45—0,47; 0,55—0,57; 0,64—0,69;	0,77—0,80	10,9—12,6
2. Мутность вод	50—100	0—30	40—100	0,3—0,5	0,5; 0,65	0,90	—
3. Картирование поверхности океана (цвет, солёность, содержание кислорода, биорганйзмы загрязнения, температура)	30—60	0—20	100	0,37—0,40; 0,43—0,45; 0,48—0,51; 0,53—0,55; 0,57—0,61; 0,66—0,70	0,40—0,43; 0,45—0,48; 0,51—0,53; 0,55—0,57; 0,61—0,66;	0,70—0,82	10,9—12,6
4. Морские льды	100—200	0—30	100—200	0,45—0,53; 0,50—0,58; 0,64—0,69	0,53—0,57; 0,57—0,64;	0,73—0,82 0,8—1,1	10,9—12,6
5. Распространение и миграция морских организмов. Биологическое загрязнение	1000	0—10	50—100	0,45—0,53; 0,57—0,64; 0,50—0,58	0,53—0,57; 0,64—0,69;	0,73—0,82	8—14
6. Загрязнение прибрежных вод	10—30	0—10	50—100	0,45—0,53; 0,57—0,64; 0,30—0,40; 0,50—0,58	0,53—0,57; 0,64—0,69; 0,48—0,59;	0,73—0,82 0,80—0,90	10,9—12,6
II Гидрология:							
1. Речные бассейны	5—10	0—30	200	0,68—0,74		0,78—1,2	—
2. Паводки, половодья	5—15	0—10	50	0,67—0,75		0,7—1,3	10—14
3. Болота	3—5	0—10	50	0,51—0,57; 0,53—0,57; 0,64—0,69	0,62—0,67; 0,57—0,64;	0,7—1,3 0,73—0,82	10,9—12,6
4. Снежный покров (плотность, таяние)	10—50	0—20	200	0,38—0,51; 0,69—0,88;	0,44—0,52; 0,50—0,67;	0,82—0,84 0,7—1,3 0,49—1,2	—
5. Ледники и ледовый покров на реках и озёрах	5—15	0—30	50—100	0,44—0,50; 0,46—0,52; 0,50—0,58	0,50—0,55; 0,52—0,58;	0,79—0,84 0,7—1,3	8—14
6. Дождевые осадки и увлажнения почв	5—30	0—10	50	0,49—1,2		0,78—0,84 0,8—1,3	8—14 10,9—12,6
7. Загрязнения водоёмов	5—10	0—10	200	0,3—0,4;	0,48—0,59	0,8—0,9	8—14 10—12
III Геология:							
1. Картирование рельефа	10—20	0—30	100—500	0,51—0,63;	0,63—0,70	0,70—0,89 0,89—1,0 0,8—1,3	8—14
2. Вулканическая деятельность	10—20	0—20	100—200	0,4—0,7		—	10—12 8—14
3. Литологическое картирование	10—20	0—30	100—200	0,51—0,63; 0,40—0,48; 0,62—0,67	0,63—0,70; 0,51—0,57;	0,70—0,89 0,89—1,0	8—10 10—10,6 10,6—12,9 9,3—12,8
IV. Лесное и сельское хозяйство:							
1. Картирование почв	5—15	0—45	100—200	0,62—0,67		0,74—0,85 1,5—1,8 2,0—2,6	8—14
2. Эрозия почв	5—10	0—45	40—50	0,40—0,48; 0,62—0,67	0,51—0,57;	0,73—0,78	—
3. Инвентаризация лесов	10—30	0—10	50—100	0,55—0,58;	0,70—0,74	1,5—1,8 2,0—2,6	—
4. Лесные пожары	10—20	0—70	500—1000	0,4—0,7		3,5—5,4	8—14
5. Оценка состояния сельхозкультур	5—10	0—10	50—100	0,55—0,58; 0,70—0,74; 0,59—0,68	0,66—0,70; 0,51—0,57;	0,76—0,83 1,5—1,8 2,0—2,6	8—14
6. Заболевания лесной растительности	10—15	0—10	40—50	0,40—0,44; 0,70—0,74; 0,58—0,68	0,55—0,58; 0,51—0,57;	0,78—0,84 0,83—0,86	8—14

Требования к СВЧ-системам дистанционного зондирования

Группы н/х задач	Народнохозяйственные задачи	Используемые спектральные диапазоны	Характер системы акт./пассивн.	Аппаратура
I. Океанология	1) Слежение за дрейфом морских льдов	Ku, X, C, S, L	пас.	Многоканальный радиометр
	2) Контроль возврата морских льдов	Ku, X	пас.	Радиометр, измеряющий в направлениях, близких к надиру
	3) Построение топографической карты океана	Ku	акт./пас.	Высотометр-локатор, направленный в надир
	4) Распределение температуры в атмосфере и у поверхности океана	Ka, K, Ku, X	пас.	Многоканальный сканирующий радиометр
	5) Ветер у поверхности океана	Ku, C	акт./пас.	2-лучевой докатор-скаттерометр, работающий на 2-х азимутальных направлениях
	6) Картирование солёности океана	L	пас.	Радиометр (измерения в надир)
II. Гидрология	1) Картирование поверхности вод	C, L	пас.	—»—
	2) Осадки	Q, Ka, K	пас.	—»—
	3) Атмосферный водяной пар	Q, Ka	пас.	—»—
III. Лесное и сельское хозяйство	1) Влажность грунта	L	пас.	Сканирующий радиометр-локатор с двумя приёмниками, соединёнными с двумя антеннами для горизонтальной и вертикальной поляризации
	2) Определение состояния растительности (индекс листовой поверхности, суммарная биомасса, биопродуктивность)	C	акт./пас.	
IV. Геология	1) Построение структурных и морфологических карт	Z	акт./пас.	Локатор-радиометр (измерения в надир)
	2) Картирование скрытых особенностей рельефа	Z	акт./пас.	

Таблица 3

Границы спектральных интервалов в СВЧ-диапазоне

Наименование интервала	W	Q	Ka	K	Ku
Границы, см	0,13—0,33	0,33—0,63	0,72—1,0	1,0—1,9	1,9—2,5
Наименование интервала	X	C	S	L	P
Границы, см	2,5—3,5	3,5—7,1	7,1—15,8	15,8—63	63—100

3. Анализ действующих систем наблюдений

Данные, приведенные в табл. 1, 2, демонстрируют разнообразие требований к измерительной аппаратуре. Методами оптимального планирования эксперимента [2] удастся построить оптимальные планы для систем многоцелевого назначения. Остановимся здесь лишь на анализе степени соответствия данных требований существующим образцам современной аппаратуры дистанционного зондирования [3,4].

Оптический диапазон. Для решения задач группы «океанология» в наибольшей степени подходит многоканальная аппаратура МКСМ. Каналы биоспектрометра МКСМ, центрированные при $\lambda = 415, 449, 484, 534, 569, 621$ и 676 нм ($\Delta\lambda = 10$ нм), позволяют решать многие океанологические задачи. К числу недостатков этой аппаратуры относится отсутствие измерительного канала в близкой УФ-области $0,37-0,40$ и $0,3-0,4$ мкм, а также в ближней ИК-области: $0,8-0,9$ мкм. Отметим, что схема МКСМ лучше удовлетворяет задачам океанологии, чем спектрометр CZCS, функционировавший на спутнике «Нимбус-7». Для решения задач гидрологии, геологии лесного и сельского хозяйства базовыми приборами являлись: МКФ-6, серия МСУ и РСС-2,3 и ряд др. разработок. Шестиканальная фотокамера МКФ-6 имеет неудачную схему измерений. Измерения в трех каналах (660, 720, 820 нм) подвержены влиянию озона и водяного пара. Каналы МСУ, выбранные по аналогии с американским прибором MSS, также не вполне удовлетворяют требованиям конкретных задач (см. табл. 1). В аппаратуре ТМ значительно лучше учтены эти особенности (табл. 4). Поэтому имеются две возможности. Первая — установка аппаратуры уровня ТМ. Вторая — дополнение аппаратуры МСУ или МКФ-6 спектрометром типа РСС-3М, который дает распределение радиации в диапазоне $0,4-0,7$ мкм с шагом 5 нм [5].

Таблица 4

Сравнение спектральных каналов МСУ и ТМ

МСУ	ТМ
0,5—0,6	0,45—0,52
0,6—0,7	0,52—0,60
0,7—0,8	0,63—0,69
0,8—1,1	0,76—0,90
—	1,55—1,75
—	10,4—12,5
—	2,08—2,35

Ближняя ИК-область. Здесь каналы МСУ могут в определенной степени информационно обеспечить задачи гидрологии и геологии. Для задач лесного и сельского хозяйства в МСУ и МКФ-6 нет каналов $1,5-1,8$ и $2,0-2,6$ мкм, а также «окна прозрачности» $3,7$ мкм.

Таблица 5

Выбор спектральных интервалов (мкм) методом факторного анализа

Группы н/х задач	Факторы						
	1	2	3	4	5	6	7
I Океанология	0,45—0,53	0,64—0,69	0,70—0,90	0,57—0,64	0,82—1,30	0,50—0,58	0,40—0,44
	0,45—0,53	0,64—0,69	0,70—0,75	0,62—0,64	0,96—1,10	0,50—0,57	0,42—0,44
II Гидрология	0,70—1,30	0,51—0,59	0,44—0,52	0,67—0,74	0,57—0,67	0,30—0,40	0,38—0,49
	0,96—1,10	0,51—0,57	0,44—0,52	0,67—0,74	0,62—0,67	0,70—0,75	0,42—0,49
III Геология	0,51—0,63	0,62—0,70	0,70—0,89	0,40—0,51	0,8 —1,30	—	—
	0,51—0,57	0,62—0,70	0,70—0,75	0,42—0,51	0,96—1,10	—	—
IV Лесное и сельское хозяйство	0,51—0,57	0,59—0,70	0,75—0,78	0,70—0,74	0,40—0,51	0,55—0,58	0,88—1,30
	0,51—0,57	0,62—0,70	0,76—0,78	0,70—0,74	0,42—0,51	0,55—0,57	0,96—1,10

Тепловая ИК-область. Для решения многих задач необходимо иметь не менее двух каналов в «окне прозрачности» $8-12$ мкм.

СВЧ-радиометрия. В табл. 2 дана сводка требований к активнопассивному измерительному комплексу в диапазоне длин волн $0,1-100$ см. Наиболее современная разработка — СВЧ-радиометрическая система «ИКАР-1» (ИРЭ АН СССР), которая лишь частично удовлетворяет указанным требованиям. Блок надирных трассовых радиометров (0,3; 0,8; 1,35; 2,25; 6,0 см), а также блок аналогичных сканирующих радиометров «Дельта» обеспечивают решение двух задач:

- 1) распределение температуры и влажности в атмосфере и у поверхности океана,
- 2) поле скорости ветра у поверхности океана.

Сканирующий радиометр Р-400 обеспечивает решение двух других задач:

- 1) определение состояния растительности,

2) картирование поверхности вод.

Радиовысотомер ПРВ предназначен для построения топографической карты океана. Другие задачи либо не могут быть решены, либо решаются частично.

4. Оптимальное планирование системы наблюдений

Актуальность проблемы оптимального планирования систем дистанционного зондирования из космоса определяется целым рядом причин, включая высокую стоимость проведения космических экспериментов, ограничения на вес аппаратуры, мощности источников питания и объем накапливаемой на борту информации. Кроме того, необходимо иметь в виду ряд научных аспектов проблемы интерпретации данных спутниковых измерений: математическая некорректность обратных задач (по характеристикам излученной, отраженной или поглощенной радиации необходимо восстанавливать параметры соответствующей среды), неконтролируемые флуктуации оптических характеристик атмосферы и др.

При решении задачи планирования экспериментов по дистанционному зондированию необходимо исключить два крайних случая: избыточность или недостаточность извлекаемой информации из-за неудачного выбора условий проведения эксперимента. В обоих случаях решение обратной задачи может быть в значительной степени обесценено ввиду ее некорректности.

Нами разработано два подхода к решению задачи многоцелевого планирования систем дистанционного зондирования: информационный и экономический [6]. В обоих случаях предполагается, что потребители информации, представляющие интересы различных народнохозяйственных задач, могут точно сформулировать требования к основным характеристикам информации (спектральные каналы, геометрия эксперимента, пространственно-временное разрешение и т. п.). В обсуждаемых ниже исследованиях нами использовалась сводка таких требований, представленная в [1].

Таблица 6

Характеристики спутниковой бортовой аппаратуры видимого и ближнего ИК-диапазонов

Прибор	Спектральные каналы, мкм	Пространственное разрешение, м (в надире)	Ширина полосы обзора, км	Примечание
MSS	0,50—0,60	80	185	Многоспектральный сканер
	0,60—0,70			
	0,70—0,80			
	0,80—1,10			
TM	0,45—0,52	30	185	Лэндсат-4,5 тематический картограф
	0,52—0,60			
	0,63—0,69			
	0,70—0,90			
CZCS	0,43—0,45	825	1636	Сканер цвета шельфовой зоны
	0,51—0,53			
	0,54—0,56			
	0,66—0,68			
	0,70—0,80			
HRV	0,5 —0,59	20	60	Фотосъемка акваторий
	0,61—0,68			
	0,79—0,89			
	0,51—0,73			

Информационный подход. Идея этого подхода [2] заключается в выделении важнейших факторов и определении соответствующих векторов факторных нагрузок в формализованном пространстве требований. Способ построения пространства требований и модификации используемой схемы факторного анализа представлены в [2, 6]. Результаты определения оптимальных совокупностей спектральных интервалов воспроизведены в табл. 5 для групп задач I—IV. В [2] содержатся результаты расчетов для различных комплексов народнохозяйственных задач. Подчеркнем, что данные табл. 5 (1-я строка) получены исключительно на основе рассмотрения требований потребителей информации, которые не учитывают селективность ее искажения атмосферой в различных участках электромагнитного спектра, а также экономические характеристики космических экспериментов. В табл. 5 (2-я

строка) приведены границы спектральных каналов зондирования, уточненные с учетом исключения полос поглощения H_2O , O_3 и NO_2 , в следующих интервалах: 0,38–0,42; 0,57–0,62; 0,755–0,760; 0,785–0,790; 0,810–0,845; 0,910–0,960; 1,10–1,16 мкм. Сильный вклад молекулярного рассеяния атмосферой обуславливает малую информативность канала 0,30–0,40 мкм. Поэтому такой канал не используется в аппаратурных реализациях систем дистанционного зондирования (см. табл. 6).

Проведем анализ возможностей используемой аппаратуры с учетом требований потребителей. Если теперь расположить выбранные спектральные каналы зондирования в последовательности возрастания длины волны, то можно установить соотношение между аналогичными каналами, отвечающими различным группам задач (табл. 7). Как видно, коротковолновый канал 0,42–0,44 мкм необходим только в задачах океанологии. Рассматривая данные табл. 6, находим, что соответствующий канал 0,43–0,45 мкм также используется только в специализированной океанографической аппаратуре CZCS. Совокупность каналов, представленных в табл. 7 для океанологии, имеет много общего с набором спектральных каналов сканера CZCS (табл. 6). Различия в границах соответствующих спектральных интервалов обусловлены тем, что в схеме океанографического сканера не учтены должным образом требования потребителей (см. табл. 1) и спектральные оптические характеристики атмосферы. Так, например, в схеме CZCS отсутствует спектральный канал 0,62–0,64 мкм, который фигурирует в требованиях каждой из задач группы «океанология».

Таблица 7

Оптимальные спектральные каналы зондирования, соответствующие основным группам задач

Группы н/х задач	Спектральные каналы зондирования (мкм)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Океанология	0,42–0,44	0,45–0,53	0,50–0,57	—	0,62–0,64	0,64–0,69	0,70–0,75	—	0,96–1,10
Гидрология	—	0,44–0,52	0,51–0,57	—	0,62–0,67	0,67–0,74	0,70–0,75	—	0,96–1,10
Геология	—	0,42–0,51	0,51–0,57	—	0,62–0,70	—	0,70–0,75	—	0,96–1,10
Лесное и сельское хозяйство	—	0,42–0,51	0,51–0,57	0,55–0,57	0,62–0,70	—	0,70–0,74	0,76–0,78	0,96–1,10

Данные табл. 7 показывают также, что только для задач группы «лесное и сельское хозяйство» необходимы измерения в двух узких каналах: 0,55–0,57; 0,76–0,78 мкм. Однако специалисты, которых интересует упомянутая группа задач, не смогут получить информацию в этих спектральных интервалах с помощью какого-либо из существующих приборов. Узкий канал № 6 необходим для потребителей из групп «океанология» и «гидрология». Специалистов в областях «геология» и «лесное и сельское хозяйство» удовлетворяет информация, полученная в широком спектральном интервале 0,62–0,70 мкм, объединяющем каналы № 5 и 6 для задач I и II. Именно в виде одного спектрального интервала представлен этот диапазон спектра в существующих приборах. Это означает, что имеющаяся аппаратура не удовлетворяет требованиям потребителей групп задач «океанология» и «гидрология» в части, касающейся получения данных наблюдений в каналах № 5 и 6.

Сравнивая данные табл. 6 и 7, можно отметить, что информация, получаемая с помощью тематического картографа (ТМ), лучше всего согласуется с требованиями группы задач «геология» и несколько хуже — группы задач «гидрология». Многоспектральный сканер MSS еще хуже удовлетворяет требованиям потребителей. Причина в том, что он вообще не дает информации для канала № 2 (табл. 7). Каналы № 5 и 6 оптимального набора «сливаются» в один канал в его схеме. Информация для каналов 0,70–0,80; 0,80–1,10 мкм в существенной мере подвержена искажению за счет поглощения отраженного излучения атмосферными газами.

Приведенные данные указывают на то, что существующая спутниковая аппаратура в значительной мере неадекватна информационным требованиям потребителей космической информации в различных отраслях народного хозяйства.

Экономический подход. Учитывая, что в перспективе разработка и создание спутниковых систем дистанционного зондирования должны финансироваться теми отраслями народного хозяйства, которые заинтересованы в получении космической информации, возникает вопрос об экономической рентабельности планируемых комплексов аппаратуры при их долговременном функционировании на борту космических платформ. Многозональный характер космической информации и ее многоцелевое назначение позволяют проанализировать проблему оптимального планирования соответствующих наблюдательных систем с позиций максимизации интегрального показателя экономической эффективности многоцелевой наблюдательной системы V при условии, что индивидуальные эффективности для отдельных задач v_i ($i = 1, \dots, N$) регламентированы специальными ограничениями типа неравенств сверху и снизу.

Остановимся более подробно на постановке задачи. Определим c_{ij} — экономическую эффективность использования j -го измерительного канала ($j = 1, \dots, M$) для целей i -й частной задачи; d_j — полные затраты на функционирование и обработку информации j -го измерительного канала много-

целевой измерительной системы; b_i^+ , b_i^- — максимальные и минимальные значения экономической эффективности от использования данных наблюдений для целей i -й задачи. В таком случае для экономической эффективности использования j -го измерительного канала k_j получаем выражение

$$k_j = \sum_i c_{ij} - d_j \quad (j = 1, \dots, M).$$

Вводя переменную y_j , являющуюся индикатором включения в наблюдательную систему j -го канала $y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, сформулируем основную проблему планирования оптимизации в виде стандартной задачи булевого целочисленного программирования [6]:

$$\min_{y=(y_1, \dots, y_M)} \left\{ - \sum_{j=1}^M k_j y_j \right\}, \quad (1)$$

$$y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (j = 1, \dots, M) \quad (2)$$

$$b_i^- \leq \sum_{j=1}^M c_{ij} y_j \leq b_i^+ \quad (i = 1, \dots, N). \quad (3)$$

Одним из наиболее эффективных численных алгоритмов решения задачи (1)–(3) является метод Балаша [7]. Указанный метод, реализованный в стандартном пакете программ ЕС ЭВМ, использовался нами [6] для проведения ряда расчетов по планированию многоцелевых систем дистанционной индикации объектов природной среды из космоса. Как уже отмечалось, обсужденные в [1] задачи разделены на четыре большие группы: океанология, гидрология, геология, лесное и сельское хозяйство. Каждая из упомянутых групп в свою очередь подразделяется на подгруппы. Число частных задач, входящих в каждую из основных групп, колеблется от 9 до 14. Рассмотрим в качестве иллюстрации результаты выбора оптимальной совокупности спектральных каналов зондирования для многоцелевой съемки в интересах группы задач океанологии. Ниже дан перечень частных задач, входящих в группу «океанология».

- | | |
|---|--|
| 1. Состояние поверхности моря | 7. Картирование береговой линии и отмелей |
| 2. Мутность вод | 8. Батиметрия и топография льда |
| 3. Морские льды | 9. Распространение и миграция морских организмов |
| 4. Общие близбереговые морские съёмки | 10. Прибрежные загрязнения вод |
| 5. Картирование прибрежных течений и приливов | 11. Воздействие загрязнений на морскую среду |
| 6. Глобальное картирование течений, съёмки поверхности океана | 12. Изучение баров, рифов |

Общее число элементарных спектральных каналов зондирования для 12 задач ($N = 12$), входящих в группу «океанология», составляет 37 ($M = 37$). При этом число элементарных спектральных интервалов m_i , входящих в требования для i -й частной задачи, находится в пределах: $18 \leq m_i \leq 33$. Это означает, что объем информации для каждой из задач достаточно велик. Он составляет не менее половины от общего объема информации для группы задач «океанология». При создании многозональной измерительной аппаратуры можно исходить из того, что затраты будут обратно пропорциональны ширине спектрального интервала и прямопропорциональны спектральному разрешению. Пусть β — затраты на создание одного измерительного канала с разрешением 1 нм. Тогда затраты $d_{\Delta\lambda}$ создание канала с разрешением $\Delta\lambda$, (нм) будут составлять $d_{\Delta\lambda} = \beta/\Delta\lambda$. Обозначим через b общую эффективность от использования космической информации в океанологии. Введем обозначения b_i для эффективности использования космической информации в i -й задаче «океанологии». Тогда $\sum_i b_i = b$.

Пусть все b_i одинаковы. Тогда $b_i = b/N$ представляет собой среднюю эффективность, отнесенную к одной частной задаче. Вводя пороговое значение α ($0 < \alpha < 1$) допустимых отклонений от средних значений эффективности, определим ограничения

$$b_i^+ = (1 + \alpha) b_i, \quad b_i^- = (1 - \alpha) b_i \quad (i = 1, \dots, M).$$

Обозначим J_i — множество номеров каналов, входящих в требования к системе наблюдений для i -й частной задачи. Введем индикаторную функцию j -го измерительного канала согласно равенству

$$\chi_j(J) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in J \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда совокупность коэффициентов c_{ij} , фигурирующих в постановке оптимизационной задачи (1)–(3), определяется из равенства

$$c_{ij} = \frac{b_i}{m_i} \gamma_j(J_i) \quad (i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N). \quad (4)$$

С использованием конкретных числовых значений $\beta = 5$, $b = 31$ были проведены расчеты всех параметров, входящих в (1)–(3). Вычисления показателей экономической эффективности измерительных каналов ($j = 1, \dots, N$) показывают, что некоторые спектральные области являются потенциально убыточными (отрицательные значения k_j) с точки зрения многоцелевого назначения системы наблюдений. Для океанологии таковыми являются каналы в спектральной области 0,40–0,45 мкм и 0,69–0,73 мкм.

Наиболее экономически оправданы измерения в спектральных каналах: а) 0,53–0,55 мкм, б) 0,66–0,68 мкм, в) 0,59–0,61 мкм, г) 0,61–0,64 мкм, д) 0,55–0,57 мкм. Здесь достигаются максимальные значения k_j . Таким образом, даже довольно простые расчеты позволяют выделить из большого начального перечня спектральных каналов зондирования наиболее существенные с точки зрения экономических критериев.

Таким образом, каналы № 1, 7 в оптимальной схеме для задач «океанологии» с экономической точки зрения менее пригодны, чем остальные из представленных в табл. 7. Однако рассмотренные сведения должны приниматься во внимание только при проектировании специализированной океанографической аппаратуры. Для других групп задач также существуют свои «нерентабельные» области спектра. Так, например, для группы задач «лесное и сельское хозяйство» из экономических соображений более выгодно получать информацию для спектрального канала 1,5–1,8 мкм, чем для канала № 9 (0,96–1,10 мкм). При рассмотрении задач «гидрологии» вообще не обнаружилось спектральных каналов, в которых измерения могут быть убыточны.

Подводя итоги, сформулируем основные результаты:

1. Проанализированы основные объекты исследования при решении экологических задач.
2. Систематизированы требования потребителей космической информации для основных групп прикладных народнохозяйственных задач.
3. Сопоставление таких требований с характеристиками существующей аппаратуры метеорологических и природноресурсных спутников обнаружило неоптимальность последних.
4. Оптимизация по критерию максимума информативности позволила определить набор спектральных каналов зондирования в интересах четырех групп задач: океанология, гидрология, геология, лесное и сельское хозяйство.
5. Применение моделей матэкономики позволяет для каждой группы задач дифференцировать спектральные каналы зондирования по степени их экономической эффективности.

1. Кондратьев К. Я., Григорьев А. А., Покровский О. М. Информационное содержание данных космической дистанционной индикации параметров окружающей среды и природных ресурсов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 146 с.
2. Кондратьев К. Я., Покровский О. М. //Изв. АН СССР. Сер. географ. 1977. № 3. С. 83–89.
3. Кондратьев К. Я., Покровский О. М. //Изв. АН СССР. Сер. географ. 1989. № 1. С. 47–53.
4. Гоутц А. Ф., Уэллман Д. Б. //ТИИЭР. 1985. Т. 73. № 6. С. 7–29.
5. Исследование природной среды с орбитальных пилотируемых станций /Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 401 с.
6. Покровский О. М. //Труды ГГО. Вып. 518. 1988. С. 28–35.
7. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Ленинград

Поступила в редакцию
20 июня 1990 г.

О. М. Покровский. Determination of the Spaceborn Remote Sensing Systems Informativity Potentials.

The paper presents an analysis of the main objects for studies from space when solving ecological problems. A classification of the users' requirements to the information, obtained from the space, is made from the stand point of the main applied problems. Possibilities to meet these requirements are analysed taking into account the characteristics of modern instrumentation of meteorological satellites and satellites for natural resources studies from space. The use of the maximum informativity criterion allows one to determine the sets of spectral channels efficient for solving four groups of problems of oceanology, hydrology, forestry, and agriculture. The paper presents a mathematical-economical model which permits one to distinguish between the spectral channels of sensing depending on their economical effectiveness.