

**В.Б. Малышев, В.М. Мазиков, В.В. Егоров, М.А. Ермошкина,  
Н.С. Озеров, Е.В. Смирнова**

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ И ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Рассматриваются принципы организации географических информационных систем (ГИС) регионального уровня на примере Аральского региона. Показывается, что ГИС является наиболее важным элементом геоэкологического мониторинга, который представляет собой специализированную иерархическую систему многократных многоступенчатых наблюдений. Приводятся результаты анализа данных самолетной спектральной съемки прибрежной части Арала и модельных расчетов по динамике его зеркала, рассматриваемые как элементы информационного содержания ГИС и процедур мониторинга.

Скорости, масштабы и последствия антропогенно-техногенно стимулированных изменений геоэкологической обстановки в настоящее время требуют применения оперативных методов сбора, обработки и анализа различных видов геоэкологической информации, ее систематизации, выработки научно обоснованных рекомендаций по рациональному природопользованию и охране окружающей среды.

Это положение обуславливает необходимость практической реализации специализированной системы слежения за этими процессами. При создании и организации такой системы необходимо использовать следующие принципы:

во-первых, информация, получаемая в процессе функционирования системы мониторинга, должна подвергаться определенной целевой обработке и анализу, обеспечивая контроль, оценку состояний и прогноз изменений компонентов окружающей среды;

во-вторых, система мониторинга должна обеспечивать сбор, обработку, систематизацию и анализ разномасштабных данных, получаемых с определенной периодичностью с помощью аэрокосмических средств и наземных измерений в сочетании с географическими знаниями и тематическими архивными материалами;

в-третьих, система должна обладать возможностями формирования банка пространственно-распределенных данных и манипулирования многослойной, разнородной информацией.

Названные принципы придают системе мониторинга особое качество, а целевые задачи определяют ее как специализированную службу. Поэтому геоэкологический мониторинг представляется как специализированная иерархическая система многократных, многоступенчатых наблюдений, ориентированная на контроль и оценку состояния окружающей среды, прогноз изменений и выработку рекомендаций по рациональному природопользованию.

Мониторинг, включающий использование дистанционных средств, позволяет получать информацию за короткий период на больших территориях, что обеспечивает решение задачи по оценке и контролю состояния от локального уровня (район, город) до регионального (область, республика, государство или крупный физико-географический регион).

Ряд основных концептуальных положений мониторинга был сформулирован в работах Ю.А. Израэля, И.П. Герасимова [1—3]. Ю.А. Израэль в содержание и задачи мониторинга антропогенных изменений окружающей среды включает: 1) наблюдение за факторами воздействия и состояниями окружающей среды; 2) прогноз состояний биосферы; 3) оценку тенденций изменений в биосфере.

Конкретизация задач антропогенного мониторинга делает необходимым определение реальных объектов и методов его осуществления. В статье о научных основах современного мониторинга окружающей среды И.П. Герасимов предлагал объединить мониторинг в три главные «ступени или главы» – биоэкологическую, геоэкологическую, биосферную. Основными критериями такого разделения послужили различия в объектах наблюдений и факторах

воздействия. При организации всех блоков и направлений мониторинга, а особенно при разработке регионального и глобального мониторинга, оценка состояния должна проводиться как по отдельным параметрам и показателям, так и по интегральным критериям и характеристикам. Особую роль интегральные критерии (в частности, дистанционная аэрокосмическая информация) играют при оценке крупных территориальных единиц и сложных природно-антропогенных систем.

При проектировании и создании системы геоэкологического мониторинга, возникают первостепенные задачи – организация различных видов информации в соответствующую пространственно-распределенную геореляционную структуру и построение пространственно-структурной модели территории. Эти задачи, так же как и проблема структурной организации всей системы мониторинга, наиболее эффективно решаются на основе использования компьютерных географических информационных систем (ГИС).

Это направление успешно и интенсивно развивается за рубежом, а в последние годы и у нас в стране. Так, например, в 1985 году на основе базы данных FAO была организована специализированная геоинформационная система, в задачи которой входило проведение анализа и выработка рекомендаций по глобальной и региональной политике в области сельского хозяйства, изучение роста народонаселения и процессов опустынивания.

Однако проблематика геоинформационно-системного подхода имеет свои особенности и требует решения целого ряда принципиальных задач. Эти задачи, в первую очередь, связаны с особенностями различных видов информации – географической, статистической, фондовой, принадлежащей разным ведомствам; с необходимостью их структурной организации и систематизации; с использованием географических знаний в виде моделей территорий и экспертных систем.

Некоторые из названных проблем решались нами при комплексном изучении территории Приаралья с целью формирования единой структуры региональной многоцелевой геоинформационной системы на основе использования дистанционных методов.

Система состоит из четырех основных подсистем:

**Первая** подсистема представляет собой программное обеспечение системы управления базами данных и обеспечивает накопление, хранение, структурное распределение и манипуляцию с различными ее информационными слоями. Функционирование данной подсистемы обеспечивается пакетом программ EPPL7 (*Environmental Planning and Programming Language*).

**Вторая** – обеспечивает отбор и ввод в базу данных тематической географической информации, ее системный анализ, создание пространственно-структурной модели территории, которая является основой формирования единой геоинформационной системы (ЕГИС).

**Третья** – связана с информационным обеспечением системы, получением, обработкой, анализом наземных и дистанционных данных и проведением оценки текущего состояния компонентов геосистем.

**Четвертая** подсистема предназначена для разработки и использования моделей оценки параметров состояний геосистем, моделирования динамических процессов и прогнозирования их развития.

Предложенная структура обеспечивает единство системы в целом, взаимосвязь и активное функционирование указанных подсистем. ЕГИС позволяет связать тематическую географическую информацию и аэрокосмические данные с пространственно распределенной количественной и качественной (биогеофизической, геохимической и др.) информацией, обеспечивает оперативный анализ информации и возможность моделирования на основе имеющейся базы данных. Система предусматривает накопление разномасштабных данных, получаемых с определенной периодичностью при помощи дистанционных аэрокосмических измерений в сочетании с наземными географическими исследованиями и тематическими архивными данными.

Территориальная направленность исследования определяет основные параметры информационной системы – пространственное разрешение (площадные размеры и типы единиц сбора информации), масштабы свойств и отношений (размерность рассматриваемых геосистем), метрические масштабы выходной картографической документации при организации мониторинга.

При комплексном исследовании территории Приаральского региона нами были решены следующие задачи:

– проведен сбор и анализ тематической картографической информации, характеризующей состояние геосистем региона, сформирована цифровая база данных комплекса тематической

информации и наземных наблюдений;

– сформирована матрица состава и состояния компонентов геосистем путем проведения процедуры оверлея тематических карт – их совмещения и структурного анализа комбинаций значений параметров состояния геосистем. В полученной цифровой матрице каждая ячейка содержит четыре слоя информации: о почвенном покрове, химизме засоления, степени засоления, геоморфологии. Набор комбинаций компонентов геосистем позволил провести объединение территории в классы на основе однородности качественно-количественных параметров состояния и характера их взаимодействия. Данная матрица служит основой для построения пространственно-структурной модели территории.

Пространственно-структурная модель территории представляет собой результат ее районирования на основе комплексного системного анализа многослойной информации и отражает степень однородности и характер взаимодействия компонентов геосистем. Модель территории является базовым блоком при формировании многоцелевой геоинформационной системы геоэкологического мониторинга и используется для организации структуры сбора различных видов информации.

На основе пространственно-структурной модели была сформирована сеть трассовых самолетных спектральных измерений. В соответствии с этой сетью были проведены измерения спектральных характеристик классов геосистем с борта самолета-лаборатории ЯК-40 комплексом спектральной аппаратуры. Приборный комплекс позволяет синхронно получать спектральную и телевизионную информацию по трассе измерений в режиме постоянного сканирования по спектру – 0,4 с, с спектральным разрешением – 1 нм, в диапазоне – 0,4–0,85 мкм.

При оценке геоэкологического состояния территории и детализации ее пространственно-структурной модели на локально-региональном уровне с использованием дистанционной информации первостепенное значение имеет задача классификации. Одним из основных признаков при ее решении является степень однородности структуры, оценка которой проводится на основе анализа амплитудно-частотных характеристик спектральной информации с помощью преобразования Фурье.

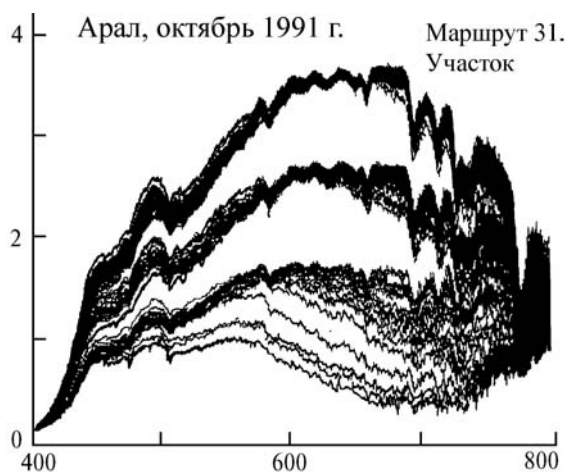


Рис. 1. Графики спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) прибрежной части Аральского моря (октябрь 1991 г.)

На графическом материале (рис. 1, 2) представлены результаты классификации, выполненной на основе анализа полученной спектральной информации, по заранее определенным трассам самолетных измерений. Анализ спектральных характеристик показывает, что основные классы территориальной модели неоднородны и разделяются на подклассы. Количество подклассов определяется различной степенью засоления почвогрунтов. Фурье анализ спектральной информации позволяет получить количественные критерии, характеризующие внутреннюю структуру каждого класса. Так, например, класс, образованный пространственно-однородным сочетанием основных природных компонентов ландшафта, включающий морские гидрогенные и остаточные гидрогенные прибрежные ракушечниково-песчано-глинистые наносы высокой степени засоленности (морские хлоридные солончаки), с помо-

щью анализа результатов спектрометрирования удалось разделить на три основных подкласса (рис. 1). Дополнительный анализ структуры каждого из этих подклассов, выполненный с помощью преобразования Фурье, позволил выделить в них 8 отдельных кластеров и определить удельный вес каждого из них (рис. 2). Из анализа результатов, представленных на этом рисунке, следует, что основной вклад в формирование подклассов вносят 5 кластеров, объединяющих подавляющее число измеренных спектров. Конкретная идентификация каждого из них выполнена на основе анализа данных наземных полевых измерений и имеющихся фондовых картографических материалов.

Результаты спектральных измерений позволяют детализировать качественные и количественные характеристики состояния геосистем, определить степень однородности имеющихся классов, характеризовать внутреннюю структуру классов и подклассов. Полученные материалы используются как новый информационный слой при уточнении и укрупнении масштаба пространственно-структурной модели территории.

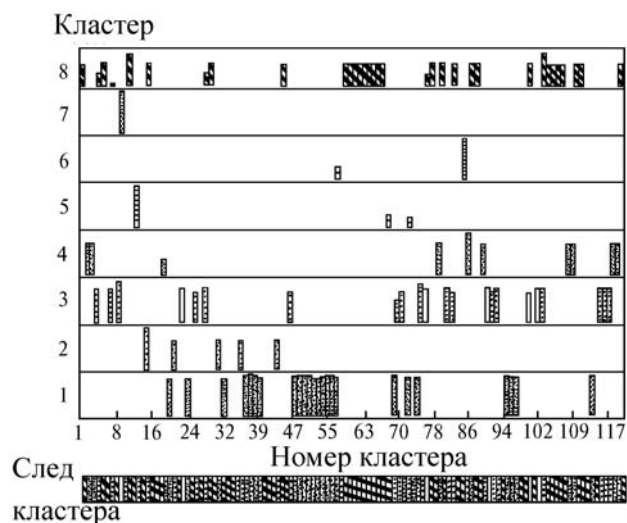


Рис. 2. Распределение спектров (рис. 1) по кластерам как результат Фурье анализа. Высота столбцов на графиках соответствует величине, обратной отклонению от центра кластера

Измеренные значения радиометрических характеристик – спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) и коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) – на следующих этапах формирования информационной системы используются для составления полей радиационных характеристик – карт спектральной яркости и спектрального альbedo, а также для изучения состояния приземного слоя атмосферы в сочетании с определенным типом подстилающей поверхности, для расчетов передаточной функции атмосферы и коэффициента задымленности.

При формировании системы геоэкологического мониторинга одним из направлений, связанных с информационным обеспечением, является тематическое картографирование, основанное на использовании космической информации.

На космических снимках, выполненных весной и осенью 1990 г., проведено компьютерное дешифрирование, основанное на анализе яркостных характеристик поверхности и данных наземных измерений. Были выделены следующие объекты: открытые водные поверхности, сезонно заболоченные участки (уровень грунтовых вод 0–30 см), сезонно увлажненные участки (30–50 см), постоянно полугидроморфные (50–150 см), постоянно автоморфные (ниже 150 см).

В результате дешифрирования построены две модели территории, отражающие реальное состояние геосистем в весенний и осенний периоды одного года. Сопоставление моделей показало существенную сезонную изменчивость состояния компонентов геосистем дельтовой части Амударьи, что особенно четко можно видеть по изменению площади затопления авандельты, по значительному увеличению открытых водных поверхностей в осенний период.

Основываясь на результатах дешифрирования, при дальнейшей их корректировке и выборочном наземном обследовании, на следующем этапе работ предполагается составление карт сезонной динамики уровня грунтовых вод дельтовой части Амударьи. По сезонным изменениям

размеров открытых водоемов можно рассчитать составляющую водного баланса региона, что, в свою очередь, может служить основой для составления серии прогнозных карт этой территории.

В условиях неполноты знаний о механизмах динамики состояний геосистем наиболее адекватным методом исследования этих процессов является, по нашему мнению, метод имитационного компьютерного моделирования. Его суть заключается в использовании системы из двух связанных нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$x_i + A_i(x_i, t) = U_i(t), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $x_i$  – параметр состояния геосистемы;  $A_i(x_i, t)$  – система нелинейных дифференциальных операторов;  $U_i(t)$  – функция источника;  $t$  – время.

Конкретное решение системы (1) выполнялось на примере изучения динамики состояния Аральского моря. В качестве параметров  $x_1$  и  $x_2$  использовались соответственно значения уровня и площади зеркала Аральского моря.

Модельные исследования включают в себя два этапа: 1) этап обучения модели, то есть параметризации уравнения (1), заключающейся в аппроксимации  $A_i(x_i, t)$  многочленом третьей степени и определении коэффициентов  $a_{ij}$  при степенных слагаемых, а также в определении  $U_i(t)$ ; 2) этап оценки текущего состояния Арала и прогноз изменений.

Исходными данными процедур моделирования служили: батиметрическая карта Арала масштаба 1:500000 с дискретизацией уровней величиной 0,5 м, а также данные многолетних (с 1925 г.) гидрологических наблюдений уровня моря и притока воды в Арал.

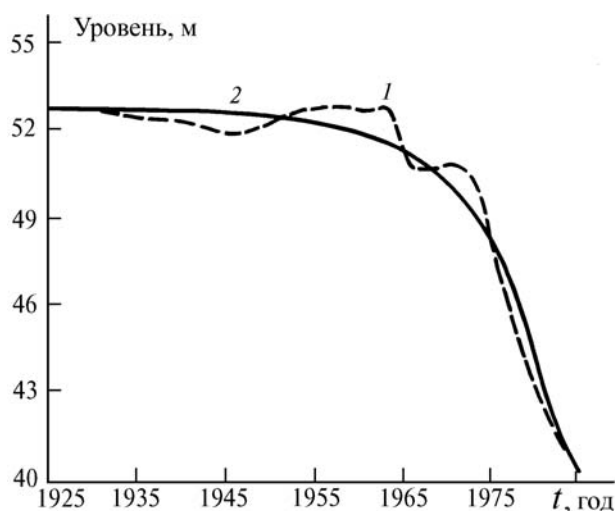


Рис. 3. Временной ход уровня Аральского моря: штриховая кривая – данные измерений гидрометеопостов; сплошная – модельный расчет (обучение)

Подготовительный этап включал в себя оцифровку батиметрической карты Арала и прилегающих территорий суши с выводом результата на экран дисплея в виде изображений размером  $128 \times 128$  пикселей. Решение системы (1) проводилось для каждого пиксела с последующим воспроизведением изображений через выбранный временной интервал.

На рис. 3 представлены результаты процедуры обучения модели, демонстрирующие точность аппроксимации временных рядов гидрологических измерений уровня моря [4].

На рис. 4 демонстрируется последовательность модельных изображений зеркала Арала начиная с 1925 и кончая 1997 г. Для верификации модели в качестве реперного изображения использовался космический снимок Арала, полученный в 1989 г. с ИСЗ «Космос–1939». При этом точность согласования зеркал реперного и модельного изображений составила около 3%. Это позволяет утверждать, что адекватность модели реальной динамике Арала достаточно высока и при сохранении существующих условий (климатических, водно-балансовых, структуры хозяйственной деятельности и т.п.) изменение зеркала моря будет идти по предложенному сценарию. Программа расчета по формуле (1) обладает также возможностью моделировать диффузионные процессы, например, эоловый перенос песка и солей, образование барханов, баров и других ана-

логичных объектов и явлений. Однако реализация моделирования этих процессов требует значительной базы реальных данных и знаний о функционировании и динамике исследуемого региона.

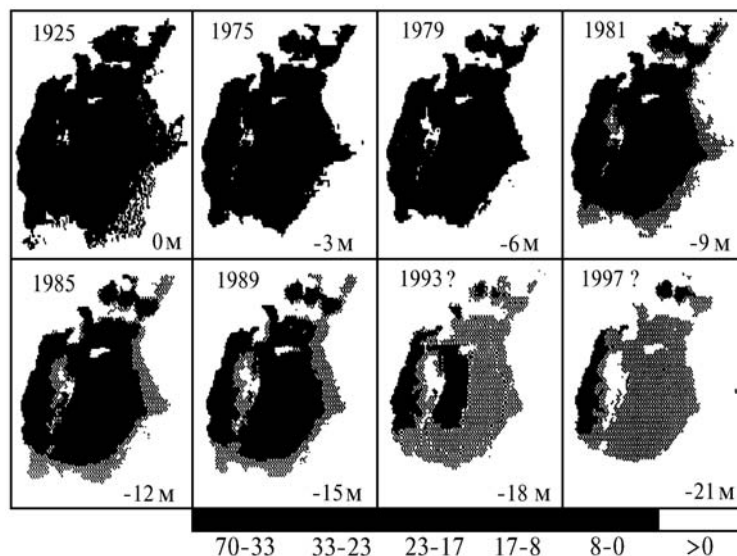


Рис. 4. Динамика зеркала Аральского моря, рассчитанная по модели для периода с 1925 по 1997 гг. Цифры указывают величину падения уровня моря относительно уровня 1925 г. Внизу приведена шкала глубин моря в метрах

В заключение следует отметить, что выполненные работы позволили:

1. Создать цифровую компьютерную базу пространственно-распределенных данных регионального уровня, включающую многослойную структуру тематической картографической информации, материалы космических съемок, авиационные и наземные данные.

2. Построить пространственно-структурную модель территории – базовый блок многоцелевой геоинформационной системы. При организации системы сбора информации о территории построенная модель позволяет учитывать как ландшафтные особенности, так и структуру регулярной сети, что является кардинальным отличительным свойством принципа сбора пространственной информации.

3. Оценить сезонную изменчивость состояния компонентов геосистем дельтовой части Амударьи.

4. На базе ГИС отработать методы имитационного компьютерного моделирования динамических процессов и принципы построения прогностических моделей.

1. Герасимов И.П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды. Изв. АН СССР. Сер. географическая. 1975. № 3. С. 13.
2. Герасимов И.П. Принципы и методы геосистемного мониторинга. Изв. АН СССР. Сер. географическая. 1982. № 1. С. 5–11.
3. Израэль Ю. А. //Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей среды. Труды международного симпозиума. Рига, 1978 г.Л.: Гидрометео-издат, 1980. С. 5–14.
4. Колбания увлажненности Арало-Каспийского региона в голоцене. (Сборник статей). М: АН СССР, 1980, 236 с.

Институт географии РАН,  
Москва

Поступила в редакцию  
13 сентября 1992 г..

V.V. Malyshev, V.M. Mazikov, V.V. Egorov, M.A. Ermoshkina, N.S. Ozerov, E.B. Smirnova. **Geoinformation Principles and Remote Methods of Regional Geocological Monitoring.**

The principles of organization of geographic information systems (GIS) of regional level are considered by the example of the Aral Region. It is evident that GIS are the most important elements of geocological monitoring, representing a specialized hierarchic system of multiple multistage observations. The paper presents the results of data analysis of airborne spectral survey of coastal part of the Aral as well as model calculations of the dynamics of the Aral water table considered as the elements of GIS information content and monitoring procedures.