Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1988, т. 115

УДК 551.3.051

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМ РЕЛЬЕФА ДНА ШЕЛЬФА

Н.М.ТАБАКАЕВ

При рассмотрении динамики донных форм рельефа шельфа обычно принимаются во внимание организующие и поддерживающие жизнь этих форм силы. В этом случае рассматривают шельфовую зону как двухкомпонентную систему гидросфера – литосфера или как трехкомпонентную, добавляя к ним атмосферу. Изучая эту систему на различных уровнях организации, ей придают взаимную причинно-следственную связь, в которой организующую роль отводят силам, связанным с динамикой гидросферы [10]. Изучая динамику гидросферы или атмосферы и оценивая их воздействие на литосферу, вводят различные энергетические коэффициенты. Это, в частности, наносодвижущие эквиваленты Р.Л.Кнапса, А.М.Жданова и др. [3, 6]. В то же время в последних работах по литодинамике шельфа появились факты, позволяющие взглянуть на проблему пространственно-временной изменчивости и устойчивости рельефа дна шельфа с новой точки зрения [8–10]. Здесь имеется в виду, во-первых, выделение донных форм или даже целых зон шельфа, сохраняющих свое местоположение, несмотря на интенсивное внешнее воздействие (пространственно-временна́я устойчивость). Следует заметить, что на эту устойчивость накладывается ограничение в виде энергетической меры воздействия внешних сил. Иначе говоря, в устойчивости форм донного рельефа при внешнем воздействии наступает такой момент, когда энергия такого воздействия превосходит внутреннюю энергию устойчивости форм рельефа и эти формы исчезают (катастрофические шторма, максимум штормовых циклов, экологические нарушения равновесия и т.п.). Во-вторых, донные формы рельефа рассматриваются не просто в качестве природного объекта со своими причинно-следственными связями, но и как физический объект, развивающийся по общефизическим законам. В этом случае для их описания могут быть использованы принципы термодинамики, статистической механики и информатики.

В последние годы во многих научных областях широко используется одно из основных понятий термодинамики – энтропия [1, 2, 5]. Несмотря на то, что энтропия появилась для описания поведения тепловых машин и позже вошла в молекулярную теорию газов, данное понятие широко вошло в статистическую механику и информатику и используется для анализа макросостояний системы. Описание энтропии газообразной системы возможно в рамках ее классического определения в виде [5]

$$S(A)=\int_0^A \frac{dQ}{T}\,, \qquad (1)$$

где $S(A)$ – энтропия газообразной системы при ее развитии от начального состояния к какому-либо промежуточному или конечному A; dQ – количество теплоты, полученное системой при движении от источника с температурой T.

Однако количество содержащихся в газообразной системе частиц ограничивается в большинстве случаев числом Авогадро. Поскольку по определению (I) энтропия является функцией объема, количества частиц и энергосодержания системы, то этой величиной удобно пользоваться при анализе как макросистемы, так и микросистем. Для того чтобы понять энергетические процессы, происходящие на макроуровне, используя такую физически удобную величину как энтропия, Больцманом [I] была получена связь между энтропией и термодинамической вероятностью системы. Энтропия в таком виде иногда носит название статистической или энтропии Гиббса. Аналитически она выглядит так

$$S(P_1,\ldots,P_n)=-\sum P_i \ln P_i = S = k \ln W_T, \qquad (2)$$

где P – вероятность появления системы в состоянии i; W_T – термодинамическая вероятность.

Из формулы (2) следует, что энтропия макросистемы представляет собой логарифм вероятности состояния системы. Данное определение энтропии уже можно использовать для анализа донных форм рельефа, так как оно позволяет оценить распределение донных наносов на шельфе и дать этому распределению физическую интерпретацию.

Большой интерес для анализа макросистем представляет информационная энтропия Шеннона [2]:

$$I=-k\sum_j P_j \ln P_j \qquad \text{или} \qquad I = k \ln \frac{P_0}{P_1} = k(\ln P_0 - \ln P_1) = S_0 - S_1, \quad (3)$$

где I и S – информационная и статистическая энтропия.

Представленная формула дает связь информации о системе с термодинамической вероятностью ее состояния.

В случаях (2) и (3) вероятность состояния системы и ее энтропию можно рассматривать как меру неопределенности поведения системы.

Развитие приложения концепции энтропии к задачам литодинамики шельфа можно начать с поиска эквивалента неопределенности в элементах шельфовой зоны как физического объекта. По сути понятие энтропии в вышеприведенных вариантах используется не только как мера неопределенности, но и как мера работы внешних сил над объектом. Если энтропия есть мера работы внешних сил над объектом, то ею можно определять степень энергетического воздействия на объект с целью его изменения или его энергетическую устойчивость. Поскольку изучаемый нами объект чаще всего находится в состоянии динамического равновесия или, как принято в термодинамике, является квазистатическим, то работа внешних сил над ним уравновешивается работой внутренних сил объекта для поддержания этого равновесия.

При квазистатическом процессе может иметь место случай, когда S = = const. В этом случае энтропия не может характеризовать состояние системы. Данное положение характерно для медленных изменений замкнутой системы, к которым наша литодинамическая система не может быть отнесена по следующим причинам. Во-первых, верхняя часть шельфа в общем случае квазизамкнутая система. Она открыта для энергомассообмена с другими системами. Во-вторых, процессы, происходящие в ней, характеризуются различной продолжительностью релаксации. В течение этого времени на всех этапах происходит интенсивный процесс как диссипации, так и накопления внутренней энергии системы. Поэтому в данном случае развитие системы не может идти медленно, эволюционно, без изменения S. В целом данное утверждение можно отнести к большинству геофизических процессов, рассматриваемых вне рамок геологического времени.

Придавая верхней части шельфа квазистатические свойства, мы тем самым полагаем происходящие здесь процессы обратимыми [7-10]. Натурные наблюдения и их соответствующая обработка позволяют говорить о верхней части шельфа как квазистатической (или, в нашей терминологии, устойчивой в пространстве и времени) и обратимой (циклической). Из этого следует, что внутреннее изменение системы будет сопровождаться изменением энтропии, что в свою очередь может характеризовать состояние системы в целом.

Рассмотрим литодинамическое приложение энтропийной концепции. Из всего многообразия характеристик, литодинамической активности шельфа выберем для примера его морфологические характеристики, описывающие пространственные изменения донных образований типа рифелей, подводных валов и т.п. Дадим им общее наименование морфологических структур или просто структур. Эти структуры являются тем формализованным объектом, обладающим объемом, массой и определенным внутренним энергосодержанием, над которым внешние силы совершают работу. Ранее мы говорили, что

$$S = f(V, N, E_c),$$

где V – объем системы; N – масса системы, выраженная в количестве каких-либо материальных частиц; E_c – энергосодержание системы.

Значит, $\Delta V = f(S)$, где ΔV – изменчивость объекта или структуры.

Таким образом, изменчивость структуры, а с нею и всей системы, частью которой является структура, функционально связана с энтропией.

Введение понятия структуры, характерного как для системных исследований, так и для геологии (хотя в геологии данное понятие довольно специфично и значительно отличается от формальной структуры системного анализа), справдана тем, что использование в дальнейшем энтропии требует формализации литодинамических параметров, пространственно-временная изменчивость которых удобно анализируется на системных принципах. Порядок анализа литодинамической системы приведен в работе [10] и в применении к энтропийным принципам может быть выражен следующим образом. Сначала определяется состояние системы, выраженное в координатах узловых точек структуры и отметках глубин (напомним, что мы характеризуем систему шельфа, опираясь на

его морфологические структуры). Затем выделяем характеристики, определяющие поведение системы, или так называемые репрезентативные признаки. Сюда должны входить характеристики внешних сил и характеристики, определяющие сами структуры. Следует заметить, что если рассматривать не только морфологические структуры, но и вещественный состав донных образований, то количество описывающих наиболее полно поведение системы признаков может быть увеличено и сами структуры будут определяться этими признаками. Таким образом, структура здесь выступает не только как некоторое пространственное тело, но и как совокупность частиц, выделяемых по их вещественному составу, спектральным и другим характеристикам. Выделение репрезентативных признаков описываемой системы можно проводить, например, с помощью R-метода факторного анализа [9].

Следующим этапом подготовки системы к анализу с помощью энтропии является выяснение ограничений, накладываемых на эту систему. Поскольку этот вопрос в детальном изложении очень сложен, то здесь стоит, видимо, только наметить те пути, которые могут оценить подобные ограничения. Разделим условно ограничения на следующие группы:

I) ограничения, связанные с пространственным положением структур и их изменением во времени (масштабом их действия и взаимодействия);

2) ограничения, налагаемые внешними силами или внешней энергией и внутренними силами структуры или их внутренней энергией.

Для выяснения ограничений первой группы незаменимой является опытная информация, используемая совместно с объективными математическими методами анализа природных процессов (метод главных компонент, теория распознавания образов и т.п.);

Анализ ограничений второй группы связан с изучением гидродинамики, гидравлики, аэродинамики, а также с подсчетом энтропии или свободной энергии Гиббса, что в целом хотя и является довольно сложной задачей для условий шельфа, но на данном этапе ее можно считать разрешимой.

Все сказанное будет справедливым для закрытых систем. В то же время рассматриваемая нами система является открытой для энергомассообмена с другими частями Мирового океана, а также для атмосферы. Для того чтобы рассмотренные принципы анализа закрытых систем можно было перенести на квазизамкнутые системы, обратимся к работам [4, 7].

В период энергетической устойчивости системы, будь то длительный штиль или длительный шторм, шельфовую систему можно рассматривать как устойчивую или квазизамкнутую систему, если известен равновесный состав всех независимых компонент. В частности, различные преобладающие в этом случае донные формы рельефа могут рассматриваться в виде независимых компонент. Для снятия ограничений по независимости компонент и замкнутости системы можно использовать выводы работ И.К.Карпова и Д.С.Коржинского, которые позволяют дать "... ясное ... функциональное описание ... моделей открытых систем различного типа как интегрального единства локальноравновесных участков совокупности систем с инертными и вполне подвижными компонентами" [4, с.87-88].

При этом должна рассматриваться так называемая мегасистема, характеризующаяся во времени постоянными градиентами факторов. Типовой мегасистемой могут являться определенные типы берегов, а локальными подвижными участками различные участки берега типа консервативных зон, выделяемых как параллельно урезу воды, так и перпендикулярно ему [8].

Таким образом, основными принципами использования схемы анализа открытой мегасистемы можно считать следующие:

I) стабильность и стационарность системы;

2) конечность числа равновесных зон мегасистемы;

3) наличие информации о количественном разделении параметров равновесных зон на инертные и мобильные;

4) возможность описания границ системы как количественно, так и качественно.

Выводы

Использование энтропийного принципа в исследовании шельфовых зон как равновесных систем даст нам возможность более точного и более обоснованного ведения разного вида работ в этих зонах Мирового океана. В частности, подсчет внутреннего энергозапаса, характеризующего пространственно-временную устойчивость какого-либо типа шельфа или его верхней части - береговой зоны, позволит выбрать соответствующую гидротехническую конструкцию, индуцирующую такое количество энергии, которого будет достаточно для разрушения или переформирования этих зон в нужном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Больцман Л. Лекции по теории газов. М., Гостехиздат, 1956.

2. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М., Физматгиз, 1960.

3. Жданов А.М. Определение мощности потока наносов непосредственными наблюдениями. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1951, № 2.

4. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск, Наука, 1981.

5. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. М., Наука, 1977.

6. Кнапс Р.Я. О методике определения характеристик движения наносов на безливных морях. - Научные сообщения Ин-та геологии и географии АН ЛитССР, 1956, т. 3.

7. Коржинский Д.С. Теория моносоматической зональности. М., Наука, 1969.

8. Табакаев Н.М. Исследование литодинамических процессов шельфа. - В кн.: Вопросы гидрологии суши. Доклады конференции молодых ученых и специалистов. Л., Гидрометеоиздат, 1978.

9. Табакаев Н.М. Опыт применения факторного анализа в исследовании береговой системы. - В кн.: Вопросы гидрологии суши. Доклады конференции молодых ученых и специалистов. Л., Гидрометеоиздат, 1980.

10. Табакаев Н.М. Структуризация береговой системы на основе многомерного анализа. - В кн.: Теоретические и методологические основы комплексного изучения и освоения шельфа. Л., изд. ВГО СССР, 1978.