

А.Н. Павлов

ОПЫТ ГРУБОЙ ОЦЕНКИ ЭНТРОПИИ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

A.N. Pavlov

EXPERIENCE OF THE ROUGH ASSESSMENT OF RIVER BASIN ENTROPY

Показана возможность энтропийного описания речного бассейна как развивающейся парагенетической системы.

Ключевые слова: энергия существования пород, модуль эрозии, бассейны рек, энергетическая энтропия, информация, фрактальность.

Possibility of the entropy description of the river basin as a developing paragenetic system is demonstrated.

Key words: energy of the existence of rocks, erosion module, river basins, energetic entropy, information, fractality.

Концентрация и рассеяние твёрдого стока ... подлежат изучению на базе современных процессов, протекающих в гигантской лаборатории земной поверхности.

А.В. Волин



Развитие речной сети приводит к непрерывной деградации площади её водосбора. Первородная целостность этой территории разрушается и дробится под действием всё возрастающего количества притоков. Этот процесс связан с разрушением горных пород. Для общей оценки этого явления целесообразно оперировать понятием *энергетической энтропии*, в данном случае для водосборного бассейна. Готовых схем для решения этой задачи нет. Правда, есть обстоятельная монография С. Федосина [13], в которой дано *энергетическое определение* энтропии. Она описывается довольно сложной формулой

$$S = - \int \frac{r \nabla(u + L - P_0) dV}{T} + \text{const}, \quad (1)$$

где u – плотность энергии поля, связанной с системой, в том числе за пределами тела; $L = - \int \frac{P}{\rho} d\rho$ – функция, зависящая от давления p и плотности вещества ρ ; r – элемент объёма, радиус-вектор; P_0 – давление в покоящейся системе отсчёта; V – объём системы; T – температура как *функция местоположения элемента объёма*.

Здесь энтропия пропорциональна отношению упорядоченной энергии, которая обеспечивает целостность и неизменность системы, к хаотической энер-

гии движения. Для нашей задачи важно, что под упорядоченной энергией понимается потенциальная (структурная) энергия вещества в гравитационном и электромагнитных полях. По существу, это энергия существования.

Автор показывает, что при длительном воздействии на систему механической работы система может разрушиться из-за недостаточности своей структурной энергии – переходит в состояние с новым положением равновесия. Это происходит из-за уменьшения градиентов поля и изменения потоков вещества (при малом оттоке энергии).

Определение С. Федосина является хорошей постановкой задачи. Однако её решение для речного бассейна получить проблематично.

На мой взгляд, существует путь, который, хотя и в грубой форме, можно реализовать. Предлагается получить изменение энтропии бассейна на основе феноменологической формулы энергосодержания пород (E), рассчитываемой по известной её массе m , петрографическому составу n_i , минералогическому составу p_j и энергии кристаллических решёток минералов U_{pj} [5, 7]:

$$E = \sum m n_i p_j U_{pj} / N_{pj} \quad (2)$$

где N_{pj} – масса одной грам-молекулы рассматриваемых минералов.

Например, если речь идёт только об одной породе, состоящей из кварца и полевого шпата, то $i = 1$, а $j = 2$, что соответствует кварцу с N_{p1} , U_{p1} и полевоому шпату с N_{p2} , U_{p2} . Поскольку расчёт ведётся для одной породы, $n_1 = 1$. Если в ней содержится кварца, скажем 30 %, а полевого шпата 70 %, то $p_1 = 0,3$, $p_2 = 0,7$.

Очевидно, что величина m может быть вынесена за знак суммы:

$$E = m \sum n_i p_j U_{pj} / N_{pj} . \quad (3)$$

Нетрудно понять, что E представляет собой средневзвешенную по составу пород энергию кристаллической решётки, которой обладает рассматриваемая породная с массой m . Она характеризует данную породу как гарант существования. Иными словами, E – это *энергия существования породы или комплекса пород как геологического массива, блока, какого-то тела и т.д.*

В физике среди различных видов энергии (тепловой, механической, электрической и т.д.) известна энергия покоя частицы, описываемая известной формулой А. Эйнштейна

$$\varepsilon = m C^2 . \quad (4)$$

Это энергия, которой обладает частица *просто в силу своего существования.*

Входя в область догадок [14], по аналогии с (4), перепишем (3) в следующем виде:

$$E = m V^2 . \quad (5)$$

Тогда получим, что

$$V^2 = \sum n_i p_j U_{pj} / N_{pj} . \quad (6)$$

Это должна быть некая предельная скорость, за которой порода как элемент Земли или Солнечной системы перестаёт существовать.

Из феноменологической формулы (3) вытекает, что $\sum n_i p_j$ – коэффициент, отражающий средний минералогический состав рассматриваемой массы пород, а $\sum n_i p_j U_{pj} / N_{pj}$ – их среднее энергосодержание на единицу массы (при условии $m = 1$).

Пример вычисления величины V^2 (6) для изверженных, пород [средний состав пород взят по Р. Гаррелсу и Ф. Маккензи [2] (табл. 1)]:

$$V_m^2 = (0,06 \cdot 4808/132 + 0,07 \cdot 4022/100 + 0,03 \cdot 3941/116 + 0,18 \cdot 10372/278 + 0,28 \cdot 11473/262 + 0,119 \cdot 11495/278 + 0,03 \cdot 3419/160 + 0,16 \cdot 3109/60) \cdot 4,1868 \cdot 10^6 = (2,18 + 2,82 + 1,02 + 6,72 + 12,26 + 7,86 + 0,64 + 8,29) \cdot 4,1868 \cdot 10^6 = 174,97 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Здесь $4,1868 \cdot 10^6$ Дж/кг – переводной коэффициент.

Аналогичный расчёт для осадочных пород даёт величину $V_{ос}^2 = 167,44 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (табл. 2). Средний состав осадочных пород также взят из работы Гаррелса и Маккензи [2] (табл. 2).

Таблица 1

Расчётные параметры для магматических пород

| Минерал | $p_i, \%$ | $U_{pi}, \text{ ккал/моль}$ | $N_{pi}, \text{ моль [12]}$ |
|--|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Ферросилит FeSiO_3 | 6 | 4804 [Сауков, 1966] | 132 |
| Энстатит MgSiO_3 | 7 | 4022 [Щербина, 1972] | 100 |
| Волластонит CaSiO_3 | 3 | 3941 [Щербина, 1972] | 116 |
| Анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ | 18 | 10372 [Щербина, 1972] | 278 |
| Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 28 | 11473 [Щербина, 1972] | 262 |
| Калиевый полевой шпат KAlSi_3O_8 | 19 | 1495 [Щербина, 1972] | 278 |
| Гематит Fe_2O_3 | 3 | 3419 [Мамулов, 1961] | 160 |
| Кварц SiO_2 | 16 | 3109 [Щербина, 1972] | 60 |

Примечание. Здесь и далее в таблицах: источники [Мамулов, 1961, Щербина, 1972] – экспериментальные данные; источник [Сауков, 1966] – вычислено по экам Е. Ферсмана [7].

Таблица 2

Расчётные параметры для осадочных пород

| Минерал | $p_i, \%$ | $U_{pi}, \text{ ккал/моль}$ | $N_{pi}, \text{ моль [12]}$ |
|---|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 6 | 11473 [Щербина, 1972] | 262 |
| Калиевый полевой шпат KAlSi_3O_8 | 6 | 1495 [Щербина, 1972] | 278 |
| Гематит Fe_2O_3 | 4 | 3419 [Мамулов, 1961] | 160 |
| Кварц SiO_2 | 35 | 3109 [Щербина, 1972] | 60 |
| Кальцит CaCO_3 | 7 | 648 [Сауков, 1966] | 100 |
| Доломит $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ | 4 | 1386 [Сауков, 1966] | 184 |
| Иллит $[\text{K}_{0,6}\text{Mg}_{0,3}\text{Al}_{2,2}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_{0,2}]$ | 27 | 25423 [Сауков, 1966] | 578 |
| Хлорит $[\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$ | 7 | 16559 [Сауков, 1966] | 554 |
| Монтмориллонит $[\text{Na}_{0,33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,6}\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ | 3 | 31695 [Сауков, 1966] | 809 |

Темп разрушения горных пород, слагающих речной бассейн, принято оценивать через модуль эрозии $M_э$. Его обычно выражают на основании твёрдого стока реки (при возможности учитывается и растворённая составляющая), нор-

мированного на единицу площади бассейна и единицу времени. Иногда его показывают в миллиметрах слоя (по аналогии с водным стоком).

Надо понимать, что модуль эрозии отражает *потерю системой бассейна внутренней энергии его существования как геологического тела*. Используя формулу (6), можно выразить потери в веществе (горных пород) как *потерю* запаса их внутренней энергии существования (ΔE):

$$\Delta E = M_3 \cdot V^2, \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год}). \quad (7)$$

Параметр V^2 следует считать с учётом геологического строения бассейна. Если он сложен преимущественно осадочными породами, надо использовать значение $V^2_{\text{ос}} = 167,44 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (см. табл. 2); если в бассейне преобладают магматические (изверженные) породы, то $V^2_{\text{м}} = 174,97 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (см. табл. 1). Иногда необходимо брать средние величины (по площади распространения). В работе [7] приведено и значение V^2 и для метаморфических пород. Разумеется, что необходимо внимательно относиться к размерностям при переходе от системы СИ к модульным нормировкам, принятым в гидрологии.

Величина ΔE показывает уменьшение энергии существования бассейна стока под действием внешних сил, поскольку *бассейн является открытой системой*. Внешние силы – это метеогенные факторы, энергетической основой которых является солнечное тепло. Здесь полезно привести схему теплового баланса, принятую в современной геофизике (рис. 1).

В соответствии с этой схемой полное тепловое излучение поверхности Земли составляет $396 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (по принятой в гидрологии нормировке около $1,25 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{км}^2 \cdot \text{год}$). Это тепло, теряемое Землёй как системой. Оно, безусловно, включают в себя и те затраты энергии, которые идут на формирование эрозионного стока рек. Эту долю можно оценить.

Приведём несколько примеров. Расчётные параметры для них взяты из работы А.В. Волина [1]. Заметим, что эрозия любой территории может быть сведена к совокупности эрозии находящихся в ней речных бассейнов.

1. Русская платформа

У А.В. Волина [1] приводится общий модуль эрозии $68\text{--}70 \text{ т}/\text{км}^2 \cdot \text{год}$. Принимая во внимание, что Русская платформа сложена осадочным комплексом пород, следует принять величину $V^2_{\text{ос}} = 167,44 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Получим

$$\Delta E = 70 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{км}^2 \cdot \text{год} \cdot 167,44 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1,17 \cdot 10^{13} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год}),$$

что составит от полного теплового излучения поверхности Земли около **9 %**.

2. Реки полугорных областей

Здесь А.В. Волин не даёт обобщённых показателей. Наиболее надёжные данные приводятся лишь для бассейнов рек Колорадо, По и по Армянскому нагорью:

Р. Колорадо.

$M_3 = 357 \text{ т}/\text{км}^2 \cdot \text{год}$ (по взвешенным, растворённым и донным). В этом бассейне развиты преимущественно осадочные породы. В результате получим

$\Delta E = 6 \cdot 10^{13}$ Дж/(км²·год), что составит около 48% от общих тепловых потерь.

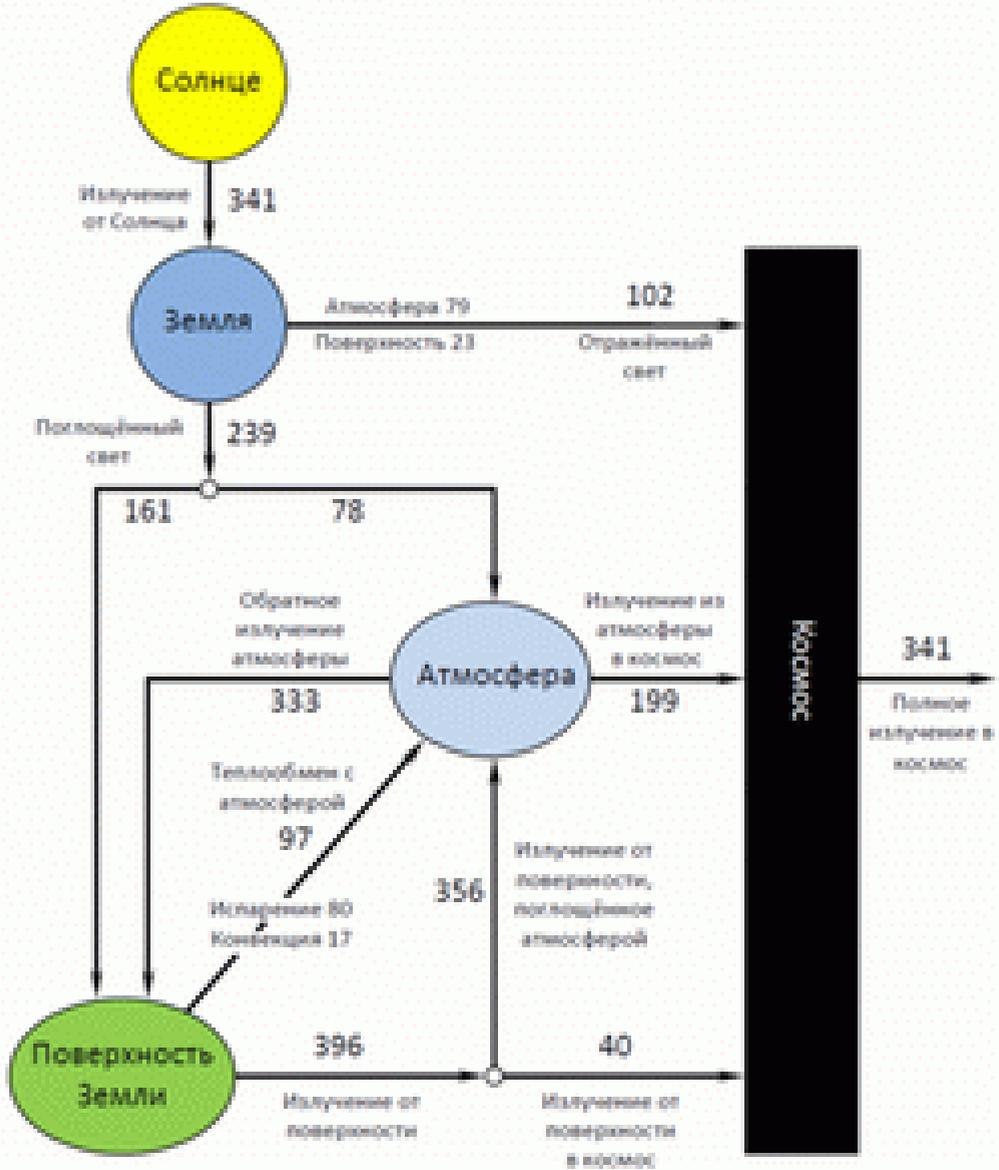


Рис. 1. Тепловой баланс Земли (март 2000 – май 2004). [Trenberth K.,...2009]

Р. По.

$M_3 = 327$ т/км²·год (по всем видам эрозии). Примем, что в этом бассейне также развиты в основном осадочные породы. В результате получим $\Delta E = 5,5 \cdot 10^{13}$ Дж/(км²·год) (около 44,5% от общих тепловых потерь).

Армянское нагорье.

В этом регионе модуль эрозии имеет более сложную структуру. Помимо взвешенных, растворённых и донных наносов ($238 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$) здесь существуют ещё и селевые выносы ($100 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$). С их учётом общий $M_3 = 383 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. Без большой ошибки можно принять, что главными породами в этом регионе являются магматические ($175 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$). Тогда $\Delta E = 6,7 \cdot 10^{13} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (около **54 %** от принятой цифры общих потерь). Если же исключить селевой сток, то аналогичный расчёт даст заметно меньшую величину – **40 %**.

3. Бассейны горных рек

Реки Большого Кавказа.

Общий модуль эрозии для рек Большого Кавказа с учётом селей $M_3 = \text{год}$ $1211 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (селевой сток – $150 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$). В рамках границ региона здесь в значительной мере развиты осадочные породы ($V_{\text{ос}}^2 = 167,44 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$).

Принимая во внимание общий модуль эрозии, получим $\Delta E = 2,02 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (**162 %** общих тепловых потерь Земли). Очевидно, что это парадоксальная ситуация. Причина её может быть связана с существенными величинами селевых потоков, появление которых может иметь другую энергетику (предположительно гравитационного характера). Кроме того, видимую абсурдность полученной цифры можно рассматривать и как локальный эффект. Ведь общие тепловые потери Земли взяты как средняя величина для планеты. Региональное же её распределение может быть довольно пёстрым и, конечно, от средней величины существенно отличаться.

Оценим энергетическое значение модуля эрозии для региона Большого Кавказа без селевого стока. В этом случае $M_3 = 1061 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, $\Delta E = 1,77 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (**141 %** общих тепловых потерь). Так что, скорее всего, такая аномалия носит региональный характер. Хотя в этом случае можно предположить и завышенность значений исходных параметров.

Заилийский Ала-тау.

Общий модуль эрозии с селевыми потоками $M_3 = 730 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. $\Delta E = 1,28 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (**102 %**). Без учёта селей $M_3 = 410 \text{ т/км}^2 \cdot \text{год}$. $\Delta E = 0,717 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (**57 %**).

Чтобы от потерь энергии (ΔE) перейти к энтропийной характеристике необходимо знать снижение температуры системы. По оценкам метеорологов полное тепловое излучение от поверхности Земли ($396 \text{ Вт}/\text{м}^2$, см. рис. 1) соответствует средней тепловой температуре 288 К (15°C).

Известно, что в тропосфере температура по мере удаления от поверхности Земли уменьшается и на верхней границе (тропопаузе) в среднем достигает минус 65 (на полюсах) – минус 70° (на экваторе) по Цельсию. Таким образом, разница температур на границах тропосферы составляет порядка 80° . Принимая эту величину за ΔT , можно оценить изменение энтропии (ΔS), связанной *эрозионной деградаций речного бассейна или их совокупности* (в модульном выражении). Для этого достаточно величины ΔE разделить на $\Delta T = 80$.

Для приведённых примеров получим:

1. Русская платформа. $\Delta S = 1,46 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град).
2. *Р. Колорадо*. $\Delta S = 7,5 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град)
3. *Р. По*. $\Delta S = 6,8 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град)
4. *Армянское нагорье*. $\Delta S = 8,37 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град)
 Без учёта селей $\Delta S = 6,19 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град)
5. *Реки Большого Кавказа*. $\Delta S = 2,53 \cdot 10^{12}$ Дж/(км²·год·град)
 Без учёта селей $\Delta S = 2,21 \cdot 10^{12}$ Дж/(км²·год·град)
6. *Заилыйский Ала-тау*. $\Delta S = 1,6 \cdot 10^{12}$ Дж/(км²·год·град).
 Без учёта селей $\Delta S = 8,96 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град).

Приведённые результаты хорошо согласуются с выводами Л.В. Пустовалова [10]: по мере старения реки и сглаживания ею рельефа суши меняется её транспортирующий характер от передвижения весьма грубых дисперсных систем в стадии молодости и до переноса коллоидальных и молекулярно- (ионно-) дисперсных систем в стадию старости.

В соответствии со вторым законом термодинамики природа развивается асимметрично: если в одном месте из хаоса возникает порядок, то где-то в другом порядке становится настолько же меньше и наоборот. Общий запас энергии в природе сохраняется, только качество её ухудшается.

Возможность связи энтропии (S) и информации (H) давно привлекала внимание учёных. В немалой степени этому способствовала тождественность их математических выражений.

Н. Винер (1958 г.) и Л. Бриллюэн (1960 г.) считали, что по своему существу они обозначают одно и то же. Это позволило трактовать информацию как отрицательную энергию (по Н.Винеру) или «негэнтропию» (по Л. Бриллюэну).

Д. Пирс (1967 г.) рассматривал понятия S и H как совершенно не связанные между собой, а тождественность их математических выражений считал случайным совпадением.

Я. А. Виньковецкий (1971 г.) пришел к выводу, что тождественность математического оформления понятий S и H – *факт фундаментального значения*, отражающий структурно-динамическое единство мира. Он предложил рассматривать вероятности, входящие в известные уравнения Л. Больцмана и К. Шеннона, как характеристики, относящиеся к событиям разных классов – соответственно, энергетическим и структурным (рис. 2).

Величины S и H отражают именно такое положение вещей и через их взаимоотношения мы можем воспринимать структурно-энергетическую устойчивость мира:

$$S_Э \cdot S_C = S \cdot H = D = \text{const.} \quad (8)$$

Таким образом, по Я. В. Виньковецкому $S \equiv S_Э$ – энергетическая энтропия, $H \equiv S_C$ – структурная энтропия. Эти величины у Я. А. Виньковецкого являются сопряжёнными, но не аддитивными, т.е. их нельзя сложить или вычесть одну из

другой, чтобы получить общую энтропию замкнутой системы в какой-то миг её эволюции. Связь S_Z и S_C Я.А. Виньковецкий воспринимал как равнобочную гиперболу (см. рис. 2).

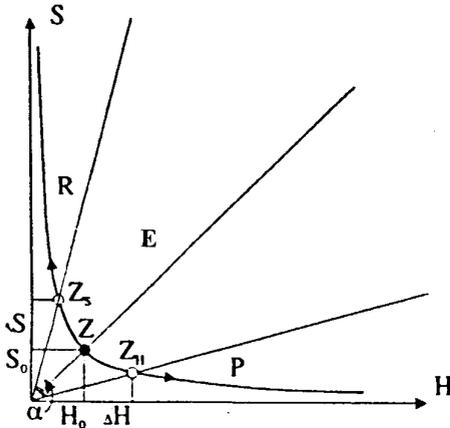


Рис. 2. Схема распределения хаоса и порядка (раздвоение точки **Z – ZERO**) [6].

R – область регрессивной эволюции;

P – область прогрессивной эволюции;

S_0, H_0 – начальные условия, $Z(S_0, H_0)$;

E – область, возникающая в результате эволюции (здесь речного бассейна);

→ направления сопряженных составляющих эволюции;

α – угол расхождения точки **ZERO**, после её раздвоения.

В соответствии с современными представлениями [4] *речной бассейн* рассматривается как сложная ландшафтная структура, получившая название – *бассейновая парагенетическая система*. Эти три слова отражают идею целостности речного бассейна, проявляющуюся в генетическом единстве составляющих её элементов (через их взаимодействие). Таким образом, дезинтеграция водосборной площади, по существу, не может рассматриваться вне формирования речной сети, как некой информационной составляющей парагенетического толка. Вот тут-то и проявляется второй, главный, смысл константы D.

А. Павлов [6] показал, что величина D это своего рода **квант действия по производству информации**.

$$D = 0,956 \cdot 10^{-23} \text{ Дж.бит/град.} \quad (9)$$

Одна молекула производит больцмановскую порцию $1,38 \cdot 10^{-23}$ джоуля тепла при уменьшении температуры на один градус.

Это тепло затрачивается на создание новых структур (у нас речной сети), но не полностью (по второму закону термодинамики всё тепло превратить в работу нельзя), а с определенным коэффициентом полезного действия (к.п.д.). Для условий точки **ZERO** к.п.д. оказался равным

$$\text{к.п.д.} = \sum P_i \cdot \ln 1/P_i = \sum 0,5 \cdot \ln 2 = 0,69. \quad (10)$$

Применительно к рассматриваемой задаче величину D следует привязать к модульным значениями энтропийных изменений (ΔS). Известно, что число Авогадро определяет количество молекул в одном моле (или кмоле и т.п.) для всех веществ ($N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹). Тогда для одного кмоля

$$D = 5,75 \cdot 10^3 \text{ Дж.бит/град.} \quad (11)$$

Очевидно, чтобы воспользоваться полученными ранее значениями ΔS , необходимо (11) связать с веществом, создающим эрозионный сток.

Из таблиц 1 и 2 видно, что в составе эродируемых пород преобладают алюмосиликаты. Поэтому не будет большим «грехом» при переходе от кмолей в (11) к массовым единицам (в СИ) свести вещественный состав к иллитам (см. табл.2). Взяв за основу его химическую формулу, не составит труда осуществить эту процедуру. Получим молярную массу – 351 кг (соответственно для кмоля $3,51 \cdot 10^5$ кг). Тогда

$$D = 2,0 \cdot 10^9 \text{ Дж.бит/град.} \quad (12)$$

Полученные в примерах значения ΔS колеблются от $1,46 \cdot 10^{11}$ Дж/(км²·год·град) до $2,53 \cdot 10^{12}$ Дж/(км²·год·град).

Используя (8), получим соответствия:

$$\Delta H = 1,37 \cdot 10^{-2} \text{ бит} \cdot \text{км}^2 \cdot \text{год} \text{ и } \Delta H = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ бит} \cdot \text{км}^2 \cdot \text{год}.$$

Здесь изменение информации выражено как **квант действия**. Это означает, что при эрозионной деградации каждый квадратный километр (км²) водосборной площади за год как бы передаёт речной сети порцию структурной энергии (в битах). Чтобы иметь о ней полное представление, необходимо полученные цифры умножить на площадь водосборной территории (F) и на время формирования речной сети.

Покажем это для Русской платформы. Поскольку при получении величины ΔS числовые характеристики брались по А. Волину [1], то и величину площади возьмём из его работы ($F = 1,76 \cdot 10^6$ км²). Время же формирования речной сети, скорей всего, следует отсчитывать от последнего крупного оледенения (Московское оледенение – $125 \cdot 10^3$ лет назад).

В результате получим:

$$\Delta H = 1,37 \cdot 10^{-2} \cdot 1,76 \cdot 10^6 \cdot 1,25 \cdot 10^5 = 3 \cdot 10^9 \text{ бит},$$

что составит около **0,4 гигабайт (ГБ)**.

Это почти в 100 раз меньше оперативной памяти самого мощного современного компьютера. *На Земле таких природных «компьютеров» много – это совокупность речных сетей разных масштабов и возрастов.* Объём их «оперативной» памяти ограничивается площадями водосборных бассейнов и временем существования речных сетей.

Хорошей иллюстрацией степени эрозионной деградации речного бассейна и параллельного ей развития речной сети может служить р. Терёшка, геоинформационное моделирование которой было успешно выполнено в Саратовском университете [8]. Не исключено, что изучение фрактальной размерности речных бассейнов позволит получить важную дополнительную информацию для создания энтропийных моделей их развития (рис. 3).

Здесь обнадёживают выводы Ю.Г. Пузаченко [9]: ...величина фрактальной размерности является хорошей мерой сложности и содержит прямую информацию о форме рельефа и вообще о пространственной структуре любого компонента.

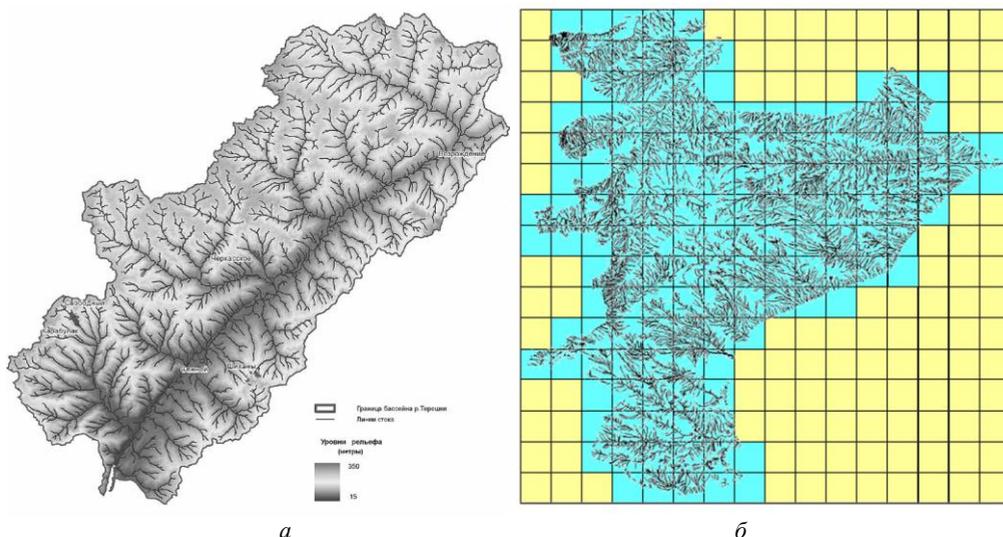


Рис. 3. Гипсометрическая карта речного бассейна.

a – р. Терёшки [8]; *б* – фрагмент фрактального анализа эрозионной сети [3]

Основная трудность, с которой, вероятно, придётся столкнуться, будет связана с получением исходных морфометрических материалов. Однако со временем она будет устраняться по мере накопления спутниковой информации.

Литература

1. *Волин А.В.* Твердый сток и сток эрозии // Изв. АН СССР, сер. геогр. и геоф., т. X. 1946.
2. *Гаррелс Р., Маккензи Ф.* Эволюция осадочных пород. – М.: Мир, 1974. – 225 с.
3. *Комплексный геоэкологический анализ* / Под ред. А.И. Иванова. – Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 2003. – 248 с.
4. *Мильков Ф.Н.* Бассейн реки как парадинамическая ландшафтная система и вопросы природопользования // География и природные ресурсы, 1981, № 4, с. 11-18.
5. *Павлов А.Н.* Квантовые принципы развития Земли – новая парадигма геологии // Принципы развития и историзма в геологии и палеобиологии. – Новосибирск: Наука, 1990, с. 115-122.
6. *Павлов А.Н.* Основы экологической культуры. – СПб.: Политехника, 2004. – 334 с.
7. *Павлов А.Н.* Методологические основания современной геологии. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 113 с.
8. *Павлов А.Н.* Квант действия по производству информации // Уч. зап. РГГМУ, 2009, № 10, с. 146-154.
9. *Пузаченко Ю.Г.* Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафтов // Изв. РАН. Сер.геогр., 1977, № 2, с. 24-40.
10. *Пустовалов Л.В.* Петрография осадочных пород, ч. I. – М.: Гостоптехиздат, 1940. – 476 с.
11. *Справочник физических величин* / Под ред. проф. Г.А. Рябина. – СПб.: Лениздат, 2001. – 160 с.
12. *Справочник физических констант горных пород.* – М.: Мир, 1969. – 543 с.
13. *Федосин С.* Физика и философия подобия от преонов до метагалактик. – Пермь: Стиль-МГ, 1999, с. 544.
14. *Фейнман Р.* Характер физических законов. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
15. *Trenberth K., Fasullo J. Kiehl J.* March 2009: Earth's global energy budget. – Bulletin of American Meteorological Society, 90, 311–323.