

Ю. Л. Руденко, Т. Г. Петров, С. В. Мошкин

## «СЛОЖНОСТЬ» И «ЧИСТОТА» ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТУРБИДИТОВ (на примере современных отложений)

**1. Введение.** Исследование морских осадков типа турбидитов представляет интерес с разных сторон: это и теория осадконакопления, и изучение процессов осадочной дифференциации вещества, и вопросы корреляции их геохимических особенностей с тектоническими условиями формирования.

Турбидиты – специфические отложения континентальных окраин, суммарный состав которых зависит от состава пород области сноса и степени переработки продуктов разрушения первичных пород при транспортировке осадков на бровку шельфа. Во время обрушения осадка, скопившегося на бровке шельфа, происходят взмучивание, перемешивание, а затем последующее осаждение частиц с одновременной их сортировкой. Формирование единичного турбидитного ритма с различающейся нижней и верхней частями – реализация процесса *разделения* вещества. Происходившая дифференциация частиц по плотности, размерам и плавучести зерен проявляется в различиях между минеральными составами отдельных частей ритма.

К сожалению, большие трудности определения минерального состава мелкозернистых осадков практически не позволяют изучать результаты процессов разделения непосредственно по минеральной составляющей осадка, что было бы методологически более корректно, а вынуждают решать задачу косвенными методами, используя обычно сильное, но, как правило, количественно не оцениваемое положение о наличии высоких корреляционных связей между минеральным и химическим составами. К числу таких косвенных методов относится применение (вместо оценки интенсивности реально идущего разделения зерен минералов и обломков горных пород) различий между химическими составами верхних и нижних частей турбидитного ритма.

Цель работы – показать, что степень дифференциации вещества в процессе турбидитообразования, выраженная через различия количественных информационных оценок сложности и чистоты химического состава верхних и нижних частей турбидитного ритма, зависит от тектономагматических режимов осадконакопления.

**2. Информационный язык *RHA*.** Как было показано, процессы разделения, наряду с процессами смешения, наиболее адекватно отображаются с помощью информационного языка *RHA* [1, 2]. Он достаточно полно описан [3, 4], неоднократно использовался в минералогических [5–8], минералого-геохимических [9], петрологических [10–13], поисково-минералогических [14–16] исследованиях, в области изучения каустобиолитов [17], а также в учебной литературе [18].

Язык как средство описания, в рассматриваемом случае химического состава, имеет три составляющие: ранговую формулу  $R$ , информационную энтропию  $H$  и анэнтропию  $A$ .

$R$  – ранговая формула – это последовательность символов компонентов (элементов) по падению их содержаний, которая является качественной, но совершенно определенной характеристикой объекта (в данном случае химического состава). Содержания выражены в атомных долях, поэтому  $\sum p_i = 1$ , где  $p_i$  – атомная доля  $i$ -го элемента в ранговой формуле. Длина  $R$  может быть любой, но для получения сопоставимых значений  $H$  и  $A$  всех изучаемых объектов длину ранговой формулы необходимо стандартизировать. Опыт показал, что

при исследовании химического состава геологических объектов оптимальное значение  $n = 10$ . (Проблемы качества публикуемых аналитических данных и их сопоставимости будут рассмотрены ниже.)

$H$  – информационная энтропия Шеннона – мера сложности состава объекта, рассчитываемая по формуле  $H = -\sum p_i \ln p_i$ . Минимально сложный объект – строго одноэлементный (где  $p_1 = 1$ , а содержания остальных равны нулю), имеет энтропию, равную нулю. Максимально сложным составом обладает объект, у которого содержания всех компонентов равны  $1/n$ , соответственно  $H_{\max} = \ln n$ . С целью нормирования – приведения значений  $H$  к интервалу 0–1 и одновременно получения значений сложности, не зависящих от основания логарифмов, – производится деление расчетной  $H$  на  $\ln n$ . С целью ухода от совпадения символов водорода и традиционного обозначения информационной энтропии для обозначения нормированной энтропии используется символ  $En$ , т.е.  $En = H/\ln n$ . Как на принципиально важное свойство информационной энтропии, обратим внимание на то, что  $H$ , умноженное на универсальную газовую постоянную, равно термодинамической энтропии смешения.

$A$  – анэнтропия – мера чистоты состава. Она рассчитывается по формуле  $A = [(-\sum \ln p_i)/n] - \ln n$ . Максимально «чистым» будет «аналитически идеально чистый» одноэлементный объект. В настоящей статье и в программе PETROS принято, что такой объект в качестве примесей содержит половины чувствительности анализа, равные 0,00005 (или 0,005 ат.%). Максимально «грязным» будет объект, в котором содержания всех элементов равны  $1/n$  (этот же состав и наиболее сложен). В соответствии со смыслом анэнтропии как меры чистоты ее величина возрастает с уменьшением содержаний второстепенных, т.е. «примесных», компонентов в системе. Анэнтропию, нормированную к интервалу 0–1 и обозначаемую  $An$ , получаем при делении реальной анэнтропии на анэнтропию аналитически идеально чистого одноэлементного вещества [19].

Весьма важным методологическим отличием предлагаемого варианта системного подхода от общеизвестного статистического является то, что в нем содержание элемента рассматривается: 1) не как случайная величина, а как определяемая историей формирования системы; 2) как свойство не самого элемента, а системы, в которой он находится. Иными словами, совокупность содержаний элементов характеризует состояние системы в целом, а не сами элементы. Обоснование этого заключается в том, что содержание каждого данного элемента, выраженное в долях (процентах) от целого, зависит от содержаний всех остальных.

Метод *RHA* поддерживается программой PETROS-2 [20], созданной в НИИ земной коры СПбГУ.

**3. Методический аспект использования энтропийных характеристик.** В контексте статьи важно выделить следующие положения:

1. Как показали многочисленные наблюдения, подавляющее большинство разнообразных геохимических процессов, сопровождающихся изменением энтропийных характеристик, относится к двум типам. Первый характеризуется возрастанием  $H$  и понижением  $A$ , второй – снижением  $H$  и ростом  $A$ . Иные тенденции изменений  $H$  и  $A$  (одновременное увеличение или уменьшение) относительно редки и относятся к переходным между указанными типами [2, 4].

2. Согласно теореме Ю. В. Шурубора [1], при разделении системы на две неидентичные по составу части происходит падение информационной энтропии (сложности) состава по крайней мере для одной из результирующих систем. Это обуславливает статистическое преобладание уменьшения энтропии при протекании процессов разделения. Таким образом, устанавливается внутренняя логическая связь между физическим процессом дифференциации вещества и его математическим отображением. Обратной теоремой доказывается, что при смешении двух систем сложность результирующей системы выше сложности, по крайней мере, одной из исходных.

3. Усреднение химических составов соответствует *смешению*. Это приводит к тому, что расчеты информационной энтропии (аналога термодинамической энтропии смешения) для средних составов дают более высокие значения, чем среднее, рассчитанное для группы  $E_n$  частных (конкретных) анализов объектов тех же видов.

4. Коэффициенты корреляции энтропийных характеристик с содержаниями отдельных элементов колеблются в широких пределах. Наибольшие отрицательные корреляции, как правило, существуют между энтропией и содержаниями первых компонентов в ранговой формуле, т.е. чем выше последние, тем ниже сложность системы. Анэнтропия имеет максимальные отрицательные корреляции с содержаниями второстепенных, малых, компонентов: чем меньше содержания компонентов среди последних членов в ранговой формуле, тем выше анэнтропия, т.е. чистота системы.

5. Для метода важна полнота анализа, под которой понимается отсутствие пропусков тех элементов, которые должны войти в ранговую формулу выбранной длины. При несоблюдении требований к полноте аналитических данных происходит искажение не только ранговых формул, но и энтропийных величин.

6. Оценка влияния химико-аналитических погрешностей на энтропийные характеристики для горных пород дает такие значения: для  $E_n - \pm 0,005$ , для  $A_n - \pm 0,004$  (по материалам [21]).

7. По мере *разделения* исходного состава ряды фигуративных точек на графике  $E_n A_n$  образуют дуги либо в сторону снижения сложности ( $E_n$ ) и повышения чистоты ( $A_n$ ), либо от исходного состава в противоположные стороны. Дуги обращены выпуклостью вниз.

8. Длина дуги между крайними точками продуктов разделения отражает степень дифференциации вещества в координатах сложности–чистоты. Отсутствие сведений о промежуточных составах между крайними частями турбидитных ритмов не позволяет измерять длины дуг, поэтому в качестве первого приближения приходится ограничиваться расчетом евклидова расстояния между парами точек, отвечающих  $E_n A_n$  составов крайних членов турбидитного ритма – песка и ила. Оно измеряется по формуле

$$D(E_n A_n) = \sqrt{(E_{n_n} - E_{n_n})^2 + (A_{n_n} - A_{n_n})^2},$$

где  $E_{n_n}$  и  $E_{n_n}$ ,  $A_{n_n}$  и  $A_{n_n}$  – энтропии и анэнтропии песка и ила соответственно.

Имея в виду непривычность энтропийных характеристик, для увязки расстояния в энтропийных единицах, т.е.  $D(E_n A_n)$ , с различиями самих химических составов учитывалось евклидово расстояние между точками в многомерном *химическом* пространстве –  $D(E_i)$ . В этом случае расчеты идут по аналогичной формуле, но используются квадраты разностей содержаний химических элементов. Результаты выражаются в атомных процентах.

Прежде чем применить метод для интерпретации тектономагматических условий формирования древних турбидитов, желательно выявить такие связи в ситуациях, когда вопрос об условиях развития турбидитов уже разрешен, т.е. использовать материалы по изучению химических составов современных образований. Представляет интерес сравнить степени сложности и чистоты крайних (нижних и верхних) частей турбидитного ритма, после чего установить, существуют ли какие-либо различия в степени дифференцированности турбидитов при разных тектономагматических режимах.

Как принципиально важное отметим, что метод *RHA* позволяет количественно оценивать степень дифференцированности вещества, абстрагируясь от конкретных особенностей химических составов осадков.

**4. Исходные материалы.** В качестве исходного материала для исследования была выбрана фундаментальная работа Мак-Леннана и др. [22]. В ней приведены химические анализы песков и илов современных турбидитов, отобранных в разных точках подножия континентального склона, которые сгруппированы в шесть геохимических выборок, в соответ-

ствии с типами континентальных окраин. Выборки упорядочены по нарастанию активности тектономагматического режима:

1) пассивные континентальные окраины западного и восточного побережий Атлантического океана (Trailing Edge Margins);

2) континентальные коллизионные окраины восточного побережья полуострова Индостан (Continent Collision Basins);

3) континентальные окраины сдвигового (Калифорнийского) типа (Strike Slip Margins) – вдоль побережья Северной Америки от залива Аляска до полуострова Калифорния;

4) окраины задуговых бассейнов (Back Arc Basins) – пробы из отложений Японского, Сулавеси, Берингова, и Южно-Китайского морей;

5) окраины континентальных дуговых бассейнов (Continental Arc Basins) – из глубоководных отложений вдоль Центрально-Американского, Перуанского и Чилийского желобов;

6) окраины преддуговых бассейнов (Fore Arc Basins) – из отложений вдоль Марианского, Идзу-Бонинского и Алеутского желобов, а также желоба, расположенного вдоль Соломоновых островов.

Как упоминалось выше, пропуск элементов в ранговой формуле и при расчете энтропийных характеристик ведет к искажению результатов при переводе данных на язык *RHA*. Поэтому, с одной стороны, отсутствие сведений о содержаниях  $H_2O$ ,  $CO_2$  и других летучих (не различаемых в *LOI*-потерях при прокаливании), а также о  $P_2O_5$ , т.е. о компонентах, значимых для осадков, не позволял надеяться на получение четких результатов. С другой стороны, существование компенсаторного эффекта при использовании интегральных характеристик составов, имеющих пропуски [19], позволял рассчитывать на возможность выявления основных тенденций развития процесса.

**5. Предварительные операции по обработке материалов.** На первом этапе работы, как пробный вариант, потери при прокаливании (не являясь химическим компонентом, но в которых явно должна была преобладать вода и/или углекислота) были приняты за воду. Полученные результаты расчетов *EnAn* обнаружили весьма большой разброс данных. Это объясняется тем, что значения потерь при прокаливании очень широко варьируют: в песках – от 0,43 до 28,6 масс.%, в илах – от 4,6 до 33,9 масс.%. Такая большая величина разброса данных в пределах однотипных объектов сама по себе представляется странной и, по всей видимости, является следствием существенных погрешностей при пробоподготовке изучавшихся объектов.

На втором этапе обработки было обращено внимание на то, что пески и илы Ганга имеют аномально высокие значения *LOI* и одновременно большие содержания  $CaO$ , что служит признаком присутствия значительных количеств карбонатов. Поскольку данные об углекислоте в анализах отсутствовали, была сделана попытка оценить содержания  $CO_2$ , входящего в состав *LOI*. Для этого был использован метод А. Н. Неелова [23], который дает возможность определять степень декарбонатизации пород. Результаты, естественно, отличались от предыдущих, но также были признаны недостаточно определенными, что привело к необходимости исключения из рассмотрения части данных по турбидитам континентальных коллизионных бассейнов (представленных отложениями Ганга, где количество карбонатов особенно велико).

Наконец, было решено пересчитать анализы на «сухой остаток», отбросив значения *LOI* и приведя содержания остальных окислов к 100%, что в принципе противоречит идеологии метода *RHA*. Эта вынужденная процедура, несколько исказившая аналитические данные, позволила избавиться от величин, не охарактеризованных химически, а также привести значения содержаний окислов во всех анализах в относительно сопоставимый вид. Таким образом, мы использовали явно неполноценные данные, надеясь на то, что ожидаемые тенденции окажутся сильнее, чем суммарные искажения первичных материалов в результате

явных погрешностей пробоподготовки и игнорирования сведений о таких значимых компонентах осадков, как вода, углекислота и фосфор.

**6. Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 приведена диаграмма  $EnAn$ , на которой выделены составы песков и илов турбидитов без их разделения по тектономагматическим обстановкам. Главное, что можно видеть, это явное тяготение илов к сложности и пониженной чистоте по сравнению с песками. Точки илов располагаются в поле со значениями  $En = 0,470-0,610$  и  $An = 0,210-0,290$ . Энтропийные характеристики песков обнаруживают существенно больший разброс, чем илов, и лежат в интервалах  $En = 0,360-0,560$  и  $An = 0,220-0,400$ . Таким образом, пески обычно имеют более низкие величины сложности и более высокие чистоты, чем илы. Однако в полученной картине принимают участие данные, относящиеся ко всем ритмам, а сами пары составов могут располагаться в областях большей или меньшей сложности, смазывая значимость реальных различий между энтропийными характеристиками верхних и нижних частей конкретных ритмов.

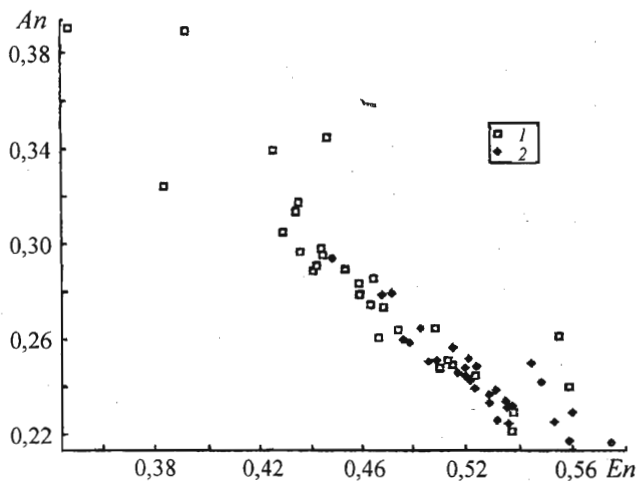


Рис. 1. Сложность—чистота песков (1) и илов (2) современных турбидитов по всем геотектоническим обстановкам (по данным [22]).

Поэтому дальнейший анализ материала более целесообразно провести в табличном варианте, где удобнее показать различия между составами в пределах каждого ритма.

В графе 1 таблицы приведены номера выборок, по которым производилось усреднение данных, в графе 2 — номера образцов, где первая цифра — номер таблицы из работы Мак-Леннана и др. [22], вторая — номер пробы в ней, затем указаны места отбора проб, сгруппированных в соответствии с тектономагматическими условиями осадконакопления (согласно представлениям авторов [22]). Порядок проб в таблице установлен таким образом, чтобы рядом находились сведения о песке и иле из одного турбидитного ритма. В графе 3 приведены величины  $En$ , в графе 4 —  $An$ ; в графы 5 и 6 помещены разности соответственно энтропии и анэнтропии песка и ила каждого турбидитного ритма. Характеристики  $D(En)$  и  $D(An)$  в выборке 6, относящиеся к паре анализов из Японии, были признаны недостоверными, помещены в скобки и при вычислении средних по выборке не учитывались. Основания для этого заключаются в том, что все достоверные значения  $D(En)$  и  $D(An)$  имеют одинаковые знаки — «минус» и «плюс» соответственно, которые отвечают интуитивно ясному представ-

лению о меньшей сложности и большей чистоте песков по сравнению с илами. То есть случай, когда ил оказался проще и чище песка, является единственным исключением из правила, позволившим исключить данные по нему из расчетов средних величин.

**Сложность—чистота и степени различий составов песков и илов**

№ выборки	Номер образца; место взятия	$E_n$	$A_n$	$D(E_n)$	$D(A_n)$	$D(E_n A_n)$	$D(E_u)$ , ат. %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	<i>Пассивные континентальные окраины</i>						
	2-1; Бискайский залив, песок	0,367	0,391				
	2-9; Бискайский залив, ил	0,545	0,291	-0,178	0,1	0,204	17,31
	2-2; Ньюфаундленд, песок	0,474	0,289				
	2-10; Ньюфаундленд, ил	0,575	0,216	-0,101	0,073	0,125	8,95
	2-4; Сомали, песок	0,403	0,324				
	2-12; Сомали, ил	0,496	0,259	-0,093	0,065	0,113	6,59
	2-7; Ангола, песок	0,412	0,39				
	2-13; Ангола, ил	0,515	0,256	-0,103	0,134	0,169	8,53
	2-8; Ангола, песок	0,486	0,286				
	2-14; Ангола, ил	0,536	0,233	-0,05	0,053	0,073	4,71
			<b>Среднее</b>	<b>-0,105</b>	<b>0,085</b>	<b>0,137</b>	<b>9,22</b>
2	<i>Коллизионные континентальные окраины</i>						
	3-2; Ганг, песок	0,457	0,296				
	3-5; Ганг, ил	0,517	0,245	-0,06	0,051	0,079	6,73
			<b>Среднее</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,051</b>	<b>0,079</b>	<b>6,73</b>
3	<i>Окраины сдвигового типа</i>						
	3-8; Аляска, песок	0,495	0,264				
	3-12; Аляска, ил	0,532	0,226	-0,037	0,038	0,053	3,39
	3-9; Аляска, песок	0,465	0,295				
	3-13; Аляска, ил	0,529	0,234	-0,064	0,061	0,088	4,94
	3-10; Каскадные горы, песок	0,487	0,261				
	3-14; Каскадные горы, ил	0,536	0,231	-0,049	0,03	0,058	4,05
			<b>Среднее</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,043</b>	<b>0,066</b>	<b>4,13</b>
4	<i>Задуговые бассейны</i>						
	4-1; Целебес, песок	0,514	0,248				
	4-9; Целебес, ил	0,52	0,246	-0,006	-0,002	0,006	0,72
	4-2; Южный Китай, песок	0,51	0,248				
	4-10; Южный Китай, ил	0,529	0,236	-0,019	0,012	0,022	1,91
	4-3; Южный Китай, песок	0,513	0,251				
	4-11; Южный Китай, ил	0,505	0,25	-0,008	-0,001	0,008	0,97
	4-4; Алеутские острова, песок	0,449	0,304				
	4-12; Алеутские острова, ил	0,509	0,25	-0,06	0,054	0,081	4,58
	4-5; Командорские острова, песок	0,479	0,278				
	4-13; Командорские острова, ил	0,49	0,279	-0,011	-0,001	0,011	3,38
	4-6; Япония, песок	0,446	0,339				
	4-14; Япония, ил	0,522	0,252	-0,076	0,087	0,116	5,63
	4-7; Япония, песок	0,484	0,275				
	4-15; Япония, ил	0,538	0,231	-0,054	0,044	0,07	4,98
	4-8; Япония, песок	0,454	0,313				
4-16; Япония, ил	0,532	0,238	-0,078	0,075	0,108	6,45	
			<b>Среднее</b>	<b>-0,037</b>	<b>0,034</b>	<b>0,053</b>	<b>3,58</b>
5	<i>Континентальные дуговые бассейны</i>						
	5-1; Зап. Мексика, песок	0,523	0,244				
	5-9; Зап. Мексика, ил	0,524	0,248	-0,001	-0,004	0,004	0,83

№ выборки	Номер образца; место взятия	$E_n$	$A_n$	$D(E_n)$	$D(A_n)$	$D(E_n A_n)$	$D(E_n)$ , ат. %
1	2	3	4	5	6	7	8
	5-2; Центр. Америка, песок	0,464	0,298				
	5-10; Центр. Америка, ил	0,52	0,244	-0,056	0,054	0,078	5,16
	5-4; Чили, песок	0,472	0,3				
	5-11; Чили, ил	0,502	0,265	-0,03	0,035	0,046	2,59
	5-5; Чили, песок	0,524	0,247				
	5-12; Чили, ил	0,522	0,243	-0,002	-0,004	0,005	0,5
	5-6; Чили, песок	0,461	0,296				
	5-13; Чили, ил	0,488	0,276	-0,027	0,02	0,034	2,24
	5-7; Ява, песок	0,462	0,289				
	5-14; Ява, ил	0,498	0,259	-0,036	0,03	0,047	3,22
	5-8; Ява, песок	0,487	0,261				
	5-15; Ява, ил	0,524	0,239	-0,037	0,022	0,043	3,26
			<b>С р е д н е е</b>	<b>-0,027</b>	<b>0,022</b>	<b>0,037</b>	<b>2,55</b>
6	<i>Преддуговые бассейны</i>						
	6-1; Марианская впадина, песок	0,557	0,262				
	6-6; Марианская впадина, ил	0,561	0,229	-0,004	0,033	0,033	1,91
	6-3; Сев. Соломоновы острова, песок	0,539	0,23				
	6-7; Сев. Соломоновы острова, ил	0,559	0,217	-0,02	0,013	0,024	1,84
	6-4; Южные Алеуты, песок	0,538	0,221				
	6-8; Южные Алеуты, ил	0,536	0,224	0,002	-0,003	0,004	1,52
	6-5; Япония, песок (?)	0,489	0,273				
	6-9; Япония, ил (?)	0,469	0,293	(+0,020)	(-0,020)	0,028	2,67
			<b>С р е д н е е</b>	<b>-0,007</b>	<b>0,014</b>	<b>0,022</b>	<b>1,99</b>

Жирным шрифтом в колонках выделены средние значения разностей по отдельным выборкам. Просмотр их в таблице сверху вниз показывает, что в этом направлении происходит монотонное изменение средних разностей  $E_n$ ,  $A_n$ , соответствующих уменьшению степени дифференцированности вещества исходного осадка при формировании турбидитного ритма от пассивных континентальных окраин до преддуговых бассейнов.

Поскольку выборки в работе [22] и в настоящей статье упорядочены по нарастанию тектономагматической активности области осадконакопления, а уменьшение разностей энтропийных величин соответствует ухудшению дифференциации исходного осадка, следует признать, что по мере увеличения тектономагматической активности степень дифференциации вещества верхних и нижних частей турбидитных ритмов, измеряемая разностями энтропии и анэнтропии, снижается.

Изложенного могло быть и достаточно, чтобы судить о наличии корреляции между напряженностью тектономагматической жизни региона и информационно-энтропийными характеристиками крайних частей турбидитного ритма, однако в данном случае удобнее иметь одну характеристику, одновременно учитывающую изменения и сложности, и чистоты.

Как было указано в п. 3, в качестве меры интенсивности переработки осадка при его движении от области питания до океана и последующей дифференциации – разделения исходного (неизвестного) состава на песок и ил, относящихся к одному ритму, можно воспользоваться измерениями евклидова расстояния на диаграмме  $E_n A_n$ . Результаты приведены в графе 7 таблицы. Как из них следует, расстояния между точками песок–ил являются наибольшими для пассивных континентальных окраин и наименьшими для преддуговых бассейнов, где точки песков и илов предельно сближены. Средние значения  $D(E_n A_n)$ , как и в предыдущих колонках, показывают монотонную зависимость от тектонической активно-

сти области осадконакопления. Поскольку характеристики расстояний не векториальны, результаты расчетов  $D(EnAn)$  для образцов из Японии здесь были учтены.

Такая же закономерность выявлена при использовании евклидовых расстояний в многомерном химическом пространстве  $DEu$ , которые приведены в графе 8.

На рис. 2 видна практически линейная зависимость между средними значениями расстояний на диаграмме  $D(EnAn)$  и средними евклидовыми расстояниями в химическом пространстве  $DEu$ . Важно отметить, что минимальные и максимальные характеристики по обеим осям различаются практически на порядок. Это свидетельствует о том, что они достоверно значимы при оценке степеней дифференциации осадков в турбидитном ритме. Причем точки, отвечающие средним характеристикам по выборкам, упорядочились по степени убывания тектономагматической активности.

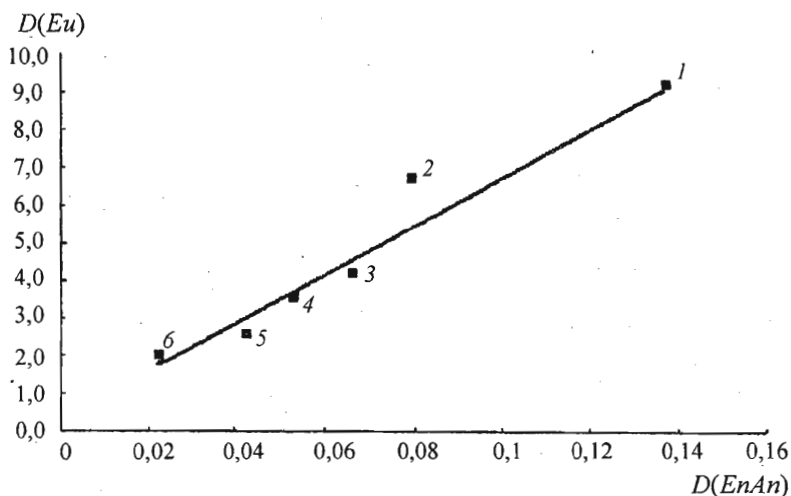


Рис. 2. Связь расстояний  $D(EnAn)$  между точками на диаграмме сложность-чистота с расстояниями между химическими составами по Евклиду,  $D(Eu)$ . 1-6 — номер выборки (см. таблицу).

Заметим, что между энтропийной мерой дифференциации и евклидовым расстоянием между составами в химическом пространстве существует принципиальное отличие. Если величина расстояния — скаляр, то соотношения между песком и илом на диаграмме  $EnAn$  выявляют направленность процесса, т.е. являются векторами. Существующее различие, не имеющее значения при измерении расстояний между составами, по Евклиду, становится явным при рассмотрении их энтропийных характеристик. Именно векториальность последних и несоответствие нормальному расположению точек песка и ила позволяют высказать серьезное подозрение, что упомянутые выше и приведенные в выборке 6 анализы из Японии песок (№ 6-5) и ил (№ 6-9) ошибочно переставлены (см. таблицу). Знаки разностей между обеими энтропийными характеристиками песка и ила, значительно превышающих погрешность определения величин  $En$  и  $An$ , в этом ритме противоречат общему правилу.

Таким образом, общая закономерность изменения составов песков турбидитов с уменьшением напряженности тектономагматического режима совпадает с изменением энтропийных характеристик составов граувакк — аркозов — олигомиктовых песков по мере их созревания (рис. 3, по материалам В. Н. Шванова [24]), а именно: сложность состава песков понижается, а мера чистоты растет, соответствуя общеизвестным представлениям об их эволюции.



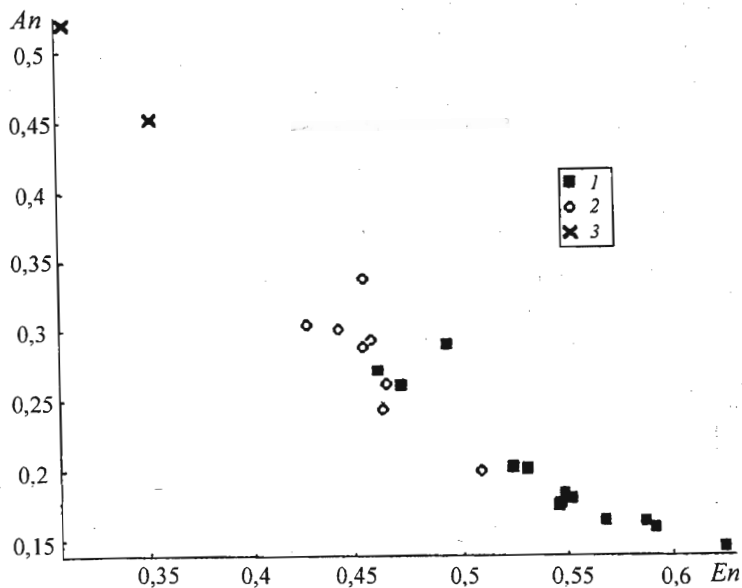


Рис. 3. Эволюция сложности-чистоты химических составов от граувакк до полимиктовых песков (по данным [24]).  
1 – граувакки; 2 – аркозы; 3 – олигомиктовые песчаники.

**7. Заключение.** В настоящей статье предложены количественные характеристики для известных в геологии качественных соотношений между тектономагматической активностью бассейна осадконакопления и степенью дифференцированности осадка в турбидитном ритме.

Установлено, что пески и илы современных турбидитов статистически различаются по энтропийным характеристикам, а именно: пески проще (энтропия меньше) и чище (анэнтропия выше), чем илы.

По энтропийным характеристикам составы песков современных турбидитов, сформировавшихся при разных тектономагматических режимах, различаются между собой в большей степени, чем составы илов.

Среднеарифметические расстояния  $D(EnAn)$  между точками составов современных песков и илов на диаграмме энтропия-анэнтропия, а также евклидовых расстояний  $D(Eu)$  между ними в многомерном химическом пространстве жестко положительно коррелируют и при этом уменьшаются по выборкам в последовательности:

- 1) пассивные континентальные окраины;
- 2) континентальные коллизионные окраины восточного побережья п-ова Индостан;
- 3) континентальные окраины сдвигового типа;
- 4) задуговые бассейны;
- 5) континентальные дуговые бассейны;
- 6) преддуговые бассейны.

Полученная последовательность отображает тенденцию возрастания тектономагматической активности.

На диаграмме  $EnAn$  в наибольшей степени перекрываются поля, принадлежащие тектономагматическим обстановкам, отмеченным пунктами 2-5, которые на данном этапе исслед-

дования объединены как плохо различимые и названы турбидитами «коллизийных континентальных окраин и дуговых бассейнов».

Несмотря на то, что исходные аналитические материалы [22] страдали весьма существенными для метода недостатками, четкость проявления найденной тенденции свидетельствует о том, что информационно-энтропийные характеристики действительно отражают связи между тектономагматическим режимом бассейна осадконакопления и различиями составов верхних и нижних частей турбидитного ритма.

Возможность решения обратной задачи, а именно, по единичным значениям расстояний между химическими составами или по расстоянию между точками на диаграмме  $EnAn$  определять тектономагматическую обстановку, на данном этапе исследования ограничена и позволяет достаточно уверенно различать лишь три обстановки: пассивные континентальные окраины; коллизийные континентальные окраины и дуговые бассейны; преддуговые бассейны.

Есть основания считать, что при наличии высококачественной аналитики и более представительных материалов выявленная тенденция может быть детализирована. В связи с этим как важный момент для повышения качества информации о химическом составе современных осадков необходимо выделить тщательность отработки процедур пробоподготовки.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования метода  $RHA$  для решения широкого круга геологических задач.

Авторы благодарят проф. Г. С. Бискэ (СПбГУ) и ведущего научного сотрудника В. Е. Руденко (ВСЕГЕИ) за советы, а также за доброжелательное и критическое отношение к работе.

## Summary

*Rudenko Yu. L., Petrov T. G., Moshkin S. V.* "Complexity" and "purity" of an elemental composition as manifestation of separation processes (on an example of recent turbidites).

Feasibility of a new technique is shown for solving the problem of matter differentiation resulted from sedimentation. The reported data on recent turbidite compositions show that the way sand-silt differentiated within a turbidite rhythm – is estimated by information entropy measure of complexity and purity of the sediment chemical composition – is in good agreement with the intensity of tectono-magmatic activity in drift areas and sedimentation basins. The technique used to treat the available analytical data (far from ideal ones, though) enables distinguishing among turbidites those from a) trailing edge margins, b) continental collision basins and arc basins, c) fore arc basins.

## Литература

1. Шурубор Ю. В. Об одном свойстве меры сложности геохимических систем // Докл. АН СССР. 1972. Т. 205, № 2.
2. Петров Т. Г. Проблема разделения и смешения в неорганических системах // Геология / Под ред. В. Т. Трофимова. М., 1995. Т. 2. З.
3. Петров Т. Г. Обоснование варианта общей классификации геохимических систем // Вестн. Ленингр. ун-та. 1971. № 18. 4.
4. Петров Т. Г. Информационный язык для описания составов многокомпонентных объектов // Научно-технич. информация. 2001. № 3. 5.
5. Петров Т. Г., Золотарев А. А. Возможности классифицирования минералов с использованием информационного языка  $RHA$  (на примере моноклиновых пироксенов) // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 2000. Ч. 129, № 3. 6.
6. Петров Т. Г., Фарафонова О. И., Соколов П. Б. Информационно-энтропийные характеристики состава минералов и горных пород как отражение напряженности процесса кристаллизации // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 2003. № 2. 7.
7. Булах А. Г., Петров Т. Г. Химическое разнообразие минералов группы эвдиалита, ранговые формулы их состава, химические и химико-структурные разновидности // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 2003. № 4. 8.
8. Золотарев А. А., Петров Т. Г., Мошкин С. В. Особенности химического состава минералов группы скаполита // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 2003. № 6. 9.
9. Петров Т. Г., Ляпичев А. Г., Суслов Г. И., Книзель А. А. Межзеренное вещество в ксенолите шпинельного лерцолита // Зап. Всерос. минерал. об-ва. 1993. Ч. 122, вып. 2. 10.
10. Гордиенко В. В. Гранитные пегматиты. СПб., 1996. 11.
11. Великославинский Д. А., Елисеев Э. Н., Кратц К. О. Вариационный анализ магматических систем. Л., 1984. 12.
12. Егоров Д. Г. Информационные меры для анализа геологических самоорганизующихся систем. СПб., 1997. 13.
13. Krasnova N. I., Petrov T. G., Mouitte J. A new rock classification system applied to ultrabasic-alkaline and phoscorite-carbonatite rocks // Periodico di Mineralogia. Special issue: Eurocarb. 2003. 14.
14. Юшкин Н. П. Теория и методы минералогии. Избранные проблемы.

Л., 1977. 15. Юшкин Н. П. Опыт среднemasштабной топоминералогии. Л., 1980. 16. Гордиенко В. В. Крупномасштабная фотодокументация и минералого-геохимический анализ геологических объектов. СПб., 1997. 17. Валков В. Н., Петров Т. Г. Элементный состав горючих ископаемых в системе рангово-энтропийных характеристик // Геология угольных месторождений / Под ред. В. П. Алексеева. Екатеринбург, 2003. 18. Логвиненко Н. В. Петрография осадочных пород. М., 1984. 19. Гордиенко В. В., Петров Т. Г. Исследование редкометальных пегматитов с использованием языка RHA // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1981. Ч. 110, вып. 5. 20. Мошкин С. В., Шелемов А. С., Петров Т. Г., Краснова Н. И. «PETROS-2» – программный комплекс для обработки петрогеохимических данных // Геохимия магматических пород / Под ред. А. А. Арзамазцева. Апатиты, 2003. 21. Кухаренко А. А., Ильинский Г. А., Иванова Т. Н. и др. Кларки Хибинского массива // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1968. Ч. 97, вып. 2. 22. McLennan S. M., Taylor S. R., McCulloch M. T., Maynard J. B. Geochemical and Nd-Sr isotopical composition of deep sea turbidites: Crustal evolution and play tectonic associations // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1990. Vol. 54, N 7. 23. Неелов А. Н. Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканических пород. Л., 1980. 24. Шванов В. Н. Петрография песчаных пород. Л., 1987.

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2004 г.