География

УДК 551.482 (476)

Е.Г. КОЛЬМАКОВА

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ РЕК

It is offered the way to indicate moments of nutrient and ion removing modification in rivers. The method is tested on the Neman drainage basin. Methodical approaches of anthropogenic chemical runoff evaluation are discussed.

Сток растворенных веществ рек представляет собой интегральную характеристику формирования химического состава поверхностных вод. С одной стороны, он определяется интенсивностью физико-химических и биологических процессов, активно протекающих при взаимодействии водных масс и коры выветривания; с другой стороны, его специфика обусловлена влиянием антропогенных факторов в речном бассейне. Исследование антропогенных изменений выноса химических веществ с речным стоком в методическом аспекте сталкивается с двумя проблемами: во-первых, со сложностью определения момента начала нарушений химического состава воды, во-вторых, с количественным учетом антропогенной составляющей стока.

В литературе встречается несколько подходов к определению *начального момента нарушений химического состава воды рек*, позволяющих разграничивать фоновый и последующие периоды. Однако вопрос остается дискуссионным с точки зрения надежности и точности получаемых результатов.

Например, анионный треугольник Фере позволяет при сопоставлении химического состава поверхностных вод за различные периоды времени очень приближенно выявить перегруппировку точек в секторах, означающую смену типа химизма поверхностных вод [1].

В качестве критерия антропогенного влияния используется и отклонение параметров от фона, определяемое как превышение измеренной концентрации вещества над верхней границей ее природной изменчивости, вычисляемое по «правилу 3σ» [2]. Однако этот способ, как и предыдущий, не применяется в отношении параметров с высокой изменчивостью ряда, которая не позволяет надежно установить их сезонные или годовые фоновые значения.

Более достоверные результаты при установлении начального момента нарушений химического состава речных вод дает графоаналитический метод разностно-интегральных кривых. Для их построения обычно пользуются среднегодовыми или средними за гидрологические фазы значениями концентраций химических веществ [3, 4]. Кроме них, в гидрохимической практике используют только соотношение концентраций SO_4^{2-}/HCO_3^-. Увеличение относительного содержания сульфат-иона в воде делает этот критерий более пригодным для диагностирования начального момента нарушений гидрохимического режима рек [5].

С нашей точки зрения, соотношение концентраций SO_4^{2-}/HCO_3^- не может быть использовано при определении начальных моментов нарушения для других компонентов солевого состава вод или биогенных элементов. В связи с этим встает задача поиска дополнительных критериев для индикации точек перелома в динамике ионного и биогенного стока.

Поэтому нами было проведено исследование изменения стока растворенных веществ рек под влиянием антропогенной нагрузки на примере бассейна р. Неман (включая р. Вилию с притоками). Объектами изучения стали водотоки, обеспеченные достаточной гидрохимической и гидрологической информацией, химический состав вод которых отражает ландшафтно-геохимические особенности дренируемых ими водосборов: Свислочь, Березина, Котра, Неман (в створах г. Столбцы и Гродно), Сервечь, Нарочь, Ошмянка, Вилия (г. Вилейка). В основе анализа лежат материалы сетевых наблюдений Гидрометеослужбы за период с 1948 по 2001 г. [6–12]. Сток растворенных веществ рассчитан общепринятым способом по среднемесячным величинам с последующим суммированием за год [13].

Сравним традиционные методики диагностирования изменения гидрохимического режима рек [3–5] с предлагаемой автором.

С этой целью для некоторых главных ионов (SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+ и K^+) общей минерализации и биогенных элементов (NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}) построены разностно-интегральные кривые, нормированные на коэффициент вариации, по:

1) значениям среднегодовых концентраций (общепринятая методика) (рис. 1 *а*);

2) отношениям среднегодовых концентраций главных ионов к концентрации гидрокарбонатов; для биогенных элементов – к концентрации минерального растворенного кремния (общепринятая методика с дополнениями автора) (рис. 1 *б*);

3) отношениям компонентов ионного стока к выносу гидрокарбонатов; для элементов биогенного стока – к выносу кремния с речным стоком (рис. 1 *в*) (методика автора).

Использование в 2) и 3) гидрокарбонат-ионов и минерального растворенного кремния связано с тем, что, во-первых, отношение указанных элементов и их форм в сточных и природных водах различно и, во-вторых, практически не зависит от колебаний водности.

Разностно-интегральные кривые, построенные по общепринятой методике, не дают достоверной картины трансформации химического состава поверхностных вод. Это видно из рис. 1 *а*, где в качестве примера приведено содержание ионов хлора в водах Свислочи (левого притока Немана). Начало нарушений режима содержания хлоридов в р. Свислочь было отмечено только в 1973 г., а устойчивый рост – с 1976 г. Такое «позднее» обнаружение точек перелома связано, вероятно, с тем, что природно-техногенный этап более длительный, чем фоновый (природный); в результате среднее значение параметра при построении кривых оказывается завышенным и не отражает того порогового значения, превышение которого свидетельствует о проявлении антропогенных факторов формирования гидрохимического режима рек. Немаловажное значение играет и водность, обусловливающая во второй половине наблюдаемого периода общую тенденцию к возрастанию или убыванию, что подтверждается и корреляционным анализом.

Как видно из рис. 1 *б*, начальный момент нарушений стока хлоридов в воде р. Свислочь при построении по соотношениям концентраций отмечается в 1971 г. В 1967 г. с помощью соотношений выносов химических веществ с речным стоком (рис. 1 *в*) обнаруживаются нарушения, вызванные хозяйственной деятельностью.

Таким образом, предлагаемые соотношения выносов химических веществ с речным стоком, например R/HCO_3^-, Cl^-/HCO_3^-, NO_3^-/Si, PO_4^{3-}/Si и др., позволяют выявить антропогенные нарушения в химическом стоке рек на раннем этапе и абстрагироваться от фактора водности. Общепринятая методика определяет изменение химического состава воды с «опозданием» на 5–10 лет.

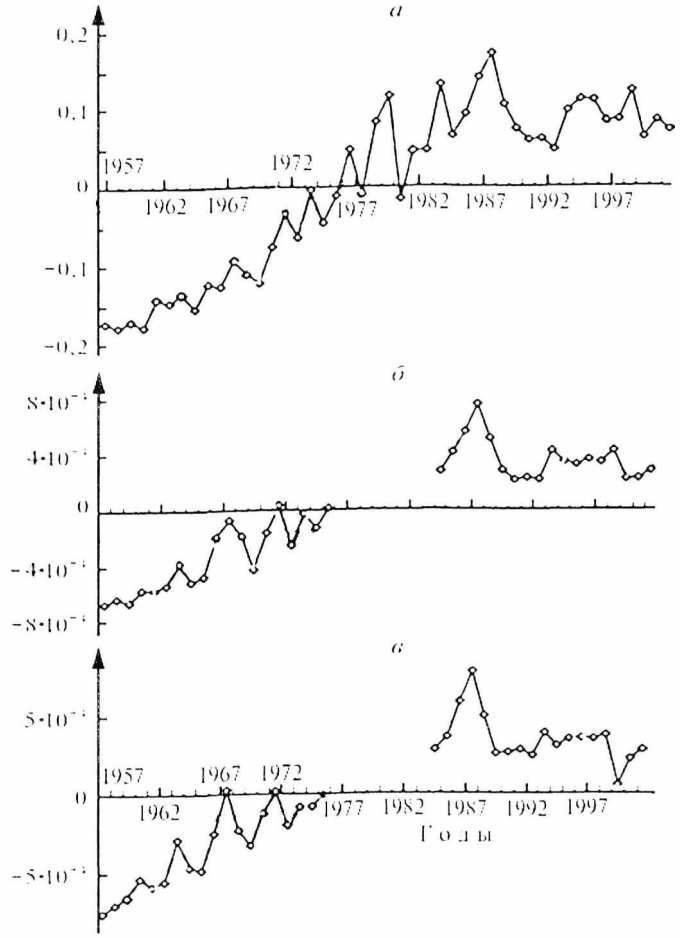

Рис. 1. Разностно-интегральная кривая хлоридов в р. Свислочь, построенная по отношениям:

а – $(C_{Cl} - \overline{C_{Cl}})/C_v$, *б* – $(C_{Cl} / C_{HCO_3} - \overline{C_{Cl}} / \overline{C_{HCO_3}})/C_v$, *в* – $(W_{Cl} / W_{HCO_3} - \overline{W_{Cl}} / \overline{W_{HCO_3}})/C_v$, где C_{Cl} – средняя концентрация ионов хлора за расчетный год; $\overline{C_{Cl}}$ – среднегодовая концентрация ионов хлора за период наблюдений; C_{HCO_3} – средняя концентрация гидрокарбонат-ионов за расчетный год; $\overline{C_{HCO_3}}$ – среднегодовая концентрация гидрокарбонат-ионов за период наблюдений; W_{Cl} – сток ионов хлора за расчетный год; W_{HCO_3} – сток гидрокарбонат-ионов за расчетный год; $\overline{W_{Cl}}$ – среднегодовой сток ионов хлора за период наблюдений; $\overline{W_{HCO_3}}$ – среднегодовой сток гидрокарбонат-ионов за период наблюдений; C_v – коэффициент вариации расчетного параметра

Анализ разностно-интегральных кривых, построенных по предлагаемому автором методу, позволил определить начальные моменты нарушения гидрохимического режима рек бассейна Немана (табл. 1).

За природный фон для компонентов солевого состава для большинства рек бассейна Немана (исключая Вилию) принят временной отрезок до 1968–1969 гг. Хотя есть реки как с более ранним проявлением нарушений (р. Свислочь), так и с более поздним (р. Березина). В выносе биогенов с речным стоком влияние хозяйственной деятельности сказалось раньше – приблизительно к 1962 г.

В бассейне р. Вилия природно-техногенный этап формирования стока растворенных веществ начинался для ионного стока с 1970 г., для биогенного – с 1964. Необходимо отметить, что первые неустойчивые признаки нарушения по азоту нитратному и фосфатам в водах рек Ошмянка, Вилия, Неман наблюдались уже в 1955–1958 гг.

Разностно-интегральные кривые позволили выявить существование третьего этапа – с 1988–1989 гг. по настоящее время, который по времени совпадает со спадом промышленного и сельскохозяйственного производства в стране. В связи с этим значительно снизились темпы выноса солей с речным стоком, что говорит о наметившейся тенденции к стабилизации качества поверхностных вод.

Таблица 1

Начало нарушений стока растворенных веществ рек бассейна Немана

Река (створ)	Годы нарушения стока растворенных веществ, определенные по:				
	Cl^-/HCO_3^-	SO_4^{2-}/HCO_3^-	R/HCO_3^-	NO_3/Si	PO_4^{3-}/Si
Свислочь	1967	1967	1967	1960	1965
Березина	1974	1970	1970	1962	1962
Котра	1966	1969	1966	–	1966
Неман (Столбцы)	1971	1967	1968	1956	1966
Неман (Гродно)	1969	1969	1969	1963*	1963
Сервечь	1968	1970	1970	1966	1960
Нарочь	1972	1970	1970	1962	1964
Ошмянка	1966	1970	1970	1963	1971
Вилия	1970	1970	1970	1964*	1959

Примечание. * Первые неустойчивые признаки нарушения были отмечены в 1956–1958 гг.

Уменьшение биогенного стока, не всегда значительное, для большинства рек наблюдалось лишь с 1995–1996 гг. Малый временной интервал не позволяет констатировать качественное изменение гидрохимических параметров вследствие снижения антропогенной нагрузки, а не в результате колебаний водности.

На основании статистических методов можно сделать вывод о трансформации стока растворенных веществ рек. При значительном воздействии антропогенных факторов должно иметь место нарушение однородности данных по стоку химических веществ. Однородность выборок, соответствующих фоновому и последующим периодам, проверяется по критериям Стьюдента и Фишера. Изменение химического стока рек можно считать доказанным, если по параметрическому критерию при заданном уровне значимости отвергается нулевая гипотеза о равенстве выборочных средних (дисперсий). Это означает, что выделенные по разностно-интегральным кривым периоды (выборки) не могут быть отнесены к одной генеральной совокупности.

Возможность применения этих параметрических критериев должна основываться на предварительной проверке исходных данных на нормальность распределения Гаусса. Сопоставление теоретического и эмпирического распределения лучше проводить при помощи критерия согласия Колмогорова – Смирнова, достоинством которого, в отличие от традиционно используемого χ^2-критерия, является то, что интеграл рассчитывается по всем точкам, чем исключается условность при разбиении ряда на интервалы. В гидрохимии часто также применяют «правило 3σ» для проверки нормальности распределений. Использование этого правила приводит к тому, что в каждом третьем случае отвергается гипотеза о нормальности распределения данных, применение же более гибкого критерия Колмогорова – Смирнова позволяет принять гипотезу о нормальности в 85 % случаев [14].

Согласно результатам статистического анализа для всех створов, за исключением створа р. Вилия (г. Вилейка), независимость фонового и природно-техногенного периодов для химического стока рек бассейна Немана подтверждается. В р. Вилия возрастающая антропогенная составляющая выноса химических веществ компенсируется значительным снижением расхода воды, связанным с переброской стока по Вилейско-Минской водной системе.

Кроме того, статистический анализ доказал правомерность выделения в динамике ионного стока третьего периода для ряда водотоков бассейна. Наиболее отчетливо его существование прослеживается для рек Вилия, Ошмянка, Сервечь, Березина, для других притоков – по отдельным параметрам.

Для оценки антропогенной составляющей при изучении изменения стока растворенных веществ применяются два метода – гидрохимического фона и «реперов» [15–17]. Количественная оценка техногенной составляющей осложняется тем, что изменения концентраций химических элементов в водотоках могут происходить вследствие природных колебаний водности.

Метод гидрохимического фона основывается на использовании в качестве эталона естественных, не нарушенных антропогенным влиянием условий формирования. Его суть сводится к оценке антропогенной составляющей (без разделения на виды хозяйственной деятельности) путем сравнения величин стока растворенных веществ за расчетный и относительного гидрохимического фона периоды с учетом поправки на водность [15]:

$$R_{ан} = R - a \cdot R_{от},$$

где $R_{ан}$ – величина антропогенной составляющей ионного стока; R – ионный сток за расчетный период; $R_{от}$ – ионный сток за период относительного гидрохимического фона; a – поправка на разницу в водном стоке, определяемая из выражения:

$$a = Q_2 \cdot C_2 / Q_1 \cdot C_1. \quad (1)$$

Здесь Q_2, Q_1 – среднегодовые расходы за расчетный и гидрохимического фона периоды; C_2, C_1 – соответствующие концентрации химических веществ.

В основе метода «реперов» по вычленению антропогенной составляющей лежат соотношения в речном стоке между биогенными элементами (главными ионами) [16, 17]. В качестве индикатора поступления в поверхностные воды антропогенного азота и фосфора используется их отношение к минеральному растворенному кремнию как к реперу, содержание которого за счет техногенных источников не изменяется. Антропогенная составляющая биогенного стока рассчитывается по формуле [16]:

$$G_a = (G_\Sigma - G_{Si}) / K_ф,$$

где G_a – антропогенная составляющая выноса биогенных элементов; G_Σ – суммарный вынос биогенов за расчетный период; G_{Si} – вынос минерального растворенного кремния. Стабильность отношений биогенных элементов Si/N и Si/P в незагрязненном речном стоке позволяет использовать их как фоновые эмпирические коэффициенты $K_ф$.

Для ионного стока в качестве «репера» рекомендуется использовать концентрацию HCO_3^- [17]. Поскольку в речных водах концентрация гидрокарбонат-ионов определяется в первую очередь карбонатно-кальциевым равновесием, то, несмотря на дополнительный привнос из антропогенных источников, их содержание в речных водах не изменяется, что обусловлено низкой растворимостью карбоната кальция.

Сравним эффективность этих методов на примере ионного стока р. Неман. Результаты количественной оценки антропогенной составляющей отражены в табл. 2.

Таблица 2

Антропогенная составляющая ионного стока р. Неман, %

Периоды	Cl^-	SO_4^{2-}	R
1969–1975	53,6 / 6,1	42,3 / 1,2	4,5 / 4,7
1976–1985	64,2 / 8,5	49,3 / –0,1	9,2 / 7,8
1986–1995	67,4 / 7,3	51,6 / 1,3	11,7 / 8,4
1996–2001	65,4 / 6,6	51,8 / 1,3	10,6 / 8,6

Примечание. В числителе отражен результат, полученный по методу «реперов», в знаменателе – по методу гидрохимического фона.

Антропогенная составляющая полного ионного стока Немана, рассчитанная по методу «реперов», незначительно отличается от вычисленной по методу гидрохимического фона. Однако отмечается существенная разница для его компонентов – сульфатов и хлоридов. Низкие значения антропогенных хлоридных и в особенности сульфатных ионов, полученные методом гидрохимического фона, должны были бы свидетельствовать о практическом отсутствии антропогенных факторов на водосборе и увеличении ионного стока исключительно за счет роста расходов воды. Однако, как видно из рис. 2, подобное изменение выноса компонентов

ионного стока не может быть объяснено исключительно фактором водности. Значит, величина антропогенной составляющей ионного стока Немана, рассчитанная по данному методу, занижена.

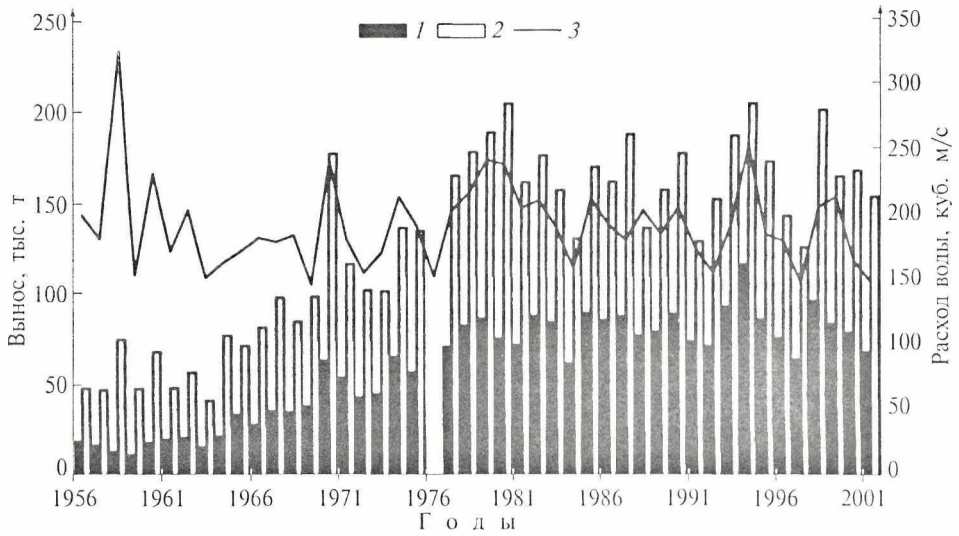

Рис. 2. Вынос хлоридов и сульфатов с речным стоком Немана (г. Гродно):
1 – хлориды; *2* – сульфаты; *3* – среднегодовой расход воды

На наш взгляд, это связано со способом расчета поправки на водность (1), которая предусматривает наличие связи между концентрацией химических веществ и расходом воды. Но для водотоков бассейна р. Неман, к примеру, такая зависимость очень слабая. Следовательно, данная поправка при отсутствии устойчивой связи между гидрохимическими и гидрологическими параметрами не отражает реального изменения водности, а значит, и величины антропогенной составляющей.

Таким образом, при построении разностно-интегральных кривых для определения моментов нарушений в динамике стока растворенных веществ рек удобными критериями являются следующие отношения выносов с речным стоком: для главных ионов – R/HCO_3^-, SO_4^{2-}/HCO_3^-, Cl^-/HCO_3^-, $Na^+ + K^+/HCO_3^-$, для биогенных элементов – NO^{2-}/Si, NO^{3-}/Si, PO_4^{3-}/Si.

При количественной оценке антропогенной доли химического стока рек надежнее метод «реперов». Применение метода гидрохимического фона возможно только по отношению к водотокам, которые характеризуются устойчивой связью между гидрохимическими и гидрологическими параметрами. Метод «реперов», основанный на особенностях геохимического поведения элементов, подобных ограничений не имеет.

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л., 1970. С. 128.
2. Скакальский Б.Г., Фертман П.Я. // Труды ГГИ. 1982. Вып. 283. С. 52.
3. Скакальский Б.Г. Антропогенные изменения химического состава воды и донных отложений в загрязняемых водных объектах: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 1996.
4. Кадацкая О.В. Гидрохимическая индикация ландшафтной обстановки водосборов. Мн., 1987.
5. Заславская М.Б., Стародубов В.В., Вырбанов М.С. // Водные ресурсы. 1991. № 3. С. 76.
6. Гидрологический ежегодник. Бассейн Балтийского моря. Л.; Вильнюс, 1950–1975. Т. 1. Вып. 5-6.
7. Гидрохимический бюллетень. Материалы наблюдений за загрязненностью поверхностных вод на территории деятельности Белорусского УГКС. Мн., 1968–1983.
8. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши: В 2 ч. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 3. Бассейны рек Белорусской ССР. Мн., 1984–2001.
9. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 5. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Мн., 1974.
10. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. 1971–1975. Т. 5. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Мн., 1978.

11. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: В 2 ч. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 3. Белорусская ССР. Мн., 1976–1980.
12. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: В 2 ч. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 3. Белорусская ССР. Мн., 1980–2001.
13. Временные методические рекомендации по расчету выноса органических, биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком. М., 1983.
14. Никаноров А.М., Никульченко Н.Н., Циркунов В.В. // Гидрохимические материалы. 1983. Т. 86. С. 131.
15. Пелешенко В.И. Оценка взаимосвязи химического состава различных типов природных вод на примере равнинной части Украины. Киев, 1975.
16. Максимова М.П. // Водные ресурсы. 1979. № 1. С. 35.
17. Максимова М.П. // Там же. 1985. № 3. С. 71.

Поступила в редакцию 22.03.2004.

Елена Геннадьевна Кольмакова – аспирант кафедры общего землеведения. Научный руководитель – кандидат географических наук, доцент кафедры общего землеведения Ю.Н. Емельянов.

УДК 550.4:551.4 (476)

Н.К. ЧЕРТКО, А.А. КАРПИЧЕНКО

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ХОЛМИСТО-МОРЕННО-ЭРОЗИОННЫХ ЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ*

Lateral and radial geochemical structure of hill-moraine-erosion landscapes of Belarus has been studied. Main factors of forming structure and its spatial allocation under conditions of Belarus have been identified. According to regularities of element accumulation within geochemical katen and soil layers lateral as ascendtial and radial as even humic-illuvial geochemical structures were determined for hill-moraine-erosion landscapes.

В геохимии ландшафтов значительное место занимает изучение структуры и систематизации химического состава ландшафтов и их компонентов. Структурный анализ дает достаточно полное представление о системе любого ранга. Наиболее информативными и репрезентативными с этой точки зрения являются ландшафтно-геохимические катены, представляющие собой сочетания сопряженных элементарных ландшафтов (фаций). В большинстве случаев в их пределах существуют однонаправленные потоки вещества из автономных ландшафтов местных водораздельных пространств к подчиненным местных депрессий. Внутри катены практически всегда присутствует локальная геохимическая контрастность, вызванная дифференциацией химических элементов под действием различных процессов, природных и техногенных факторов миграции. При сложившейся миграции вещества и энергии в ландшафте формируется его *геохимическая структура* на различных таксономических уровнях (вид, род, класс, тип и т. д.), которая характеризует устоявшуюся миграцию и концентрацию химических элементов в условиях определенной природной среды. Она необходима для решения практических задач в области экологии, здравоохранения, сельского хозяйства и при использовании геохимических методов поисков полезных ископаемых. До сих пор в научной литературе не было дано четкого определения геохимической структуры ландшафта. При разработке понятия геохимической структуры мы учитывали устоявшуюся тенденцию латерального и радиального распределения химических элементов в сложившихся природных условиях и процессах. В нашем представлении под *геохимической структурой понимается закономерное латеральное и радиальное распределение химических элементов, вызванное их дифференциацией под воздействием природных процессов, внешних и внутренних факторов миграции.*

Ввиду отсутствия общих дефиниций разнообразных геохимических структур и достаточной сложности отдельных из них [1, 2] нами был выработан понятийный аппарат *видов* структуры, основанный на закономерностях латеральной и радиальной вариаций содержания и накопления химических элементов в пределах геохимической катены (подробное описание классификации приведено в

* Авторы статьи – сотрудники кафедры почвоведения и геологии.