

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 550.4:[631.4+911.52] (571.651)

О.Д. Трегубов<sup>1</sup>

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ В ПОЧВАХ И ЛАНДШАФТАХ АНАДЫРСКОЙ ТУНДРЫ

Исследовано взаимодействие радиальных и латеральных внутрипочвенных геохимических потоков на сопряжениях элементарных ландшафтов низменных тундр. Последовательно на примере двух типичных для Анадырской низменности урочищ рассмотрено строение геохимических ландшафтов и тундровых почв, распределение концентрации Fe, Mn, Zn, Cu на площади и в разрезе. Установлены закономерности и особенности расположения отрицательных и положительных геохимических аномалий во взаимосвязи с окислительным, глеевым и сорбционным барьерами в почвах и ландшафте. Сделан вывод, что радиальные и латеральные геохимические барьеры образуют в пространстве ландшафтов единые педологические тела, морфология которых определяется рельефом мерзлотного водоупора.

*Ключевые слова:* геохимические потоки, тундровые почвы, сезонно-талый слой, тундра, геохимические аномалии.

**Введение.** Тундровые ландшафты низменностей Крайнего Северо-Востока Евразии малопривлекательны для изучения почвенных и ландшафтно-геохимических процессов в силу низкой контрастности рельефа и близкого к поверхности залегания кровли многолетней мерзлоты, преобладания торфонакопления, аномально низкой концентрации большинства химических элементов. Поэтому радиальные и латеральные геохимические потоки, механизмы их взаимодействия в типичных тундрах и тундроболотах до настоящего времени остаются малоизученными.

Проблема взаимодействия почвоведения и геохимии ландшафтов актуальна с момента обособления наук. Общим объектом исследования для геохимии почв и ландшафтов являются геохимические барьеры [Геохимические ..., 2002; Глазовская, 2012]. Каждый генетический горизонт почв может рассматриваться как геохимический барьер определенного класса на пути радиальной миграции вещества в почвенном профиле. Набор генетических горизонтов почвенного профиля, а по сути радиальных барьеров субэкранных почв, определяет геохимическую специализацию природной почвенной зоны [Глазовская, 1972; Добровольский, 2009]. В трансэлювиальном и трансупераквальном ландшафтах радиальная миграция уступает латеральной и на границах смены условий среды формируются субгоризонтальные геохимические барьеры. Неизбежно возникает вопрос, каким образом радиальные и латеральные геохимические барьеры, являясь конкретными геологическими (педологическими) телами, вмещающими геохимические аномалии, взаимодействуют в трехмерном пространстве конкретного природного ландшафта.

Рассмотрим это взаимодействие на примере тундровых ландшафтов с мелким типом сезонного протаивания и геохимическими потоками кислого и слабокислого глеевого класса водной миграции. Для геохимической индикации сезонной оттайки автором были выявлены и описаны почвенные и ландшафтные геохимические барьеры [Трегубов, 2013]. Естественным продолжением исследования стала попытка анализа природы и формы сопряжения радиальных и латеральных геохимических потоков, чему и посвящается настоящая статья.

**Объекты и методы исследования.** Анадырская низменность в границах южных кустарниковых тундр занимает нижнее течение р. Анадырь, большей своей частью расположена на побережье Анадырского залива Берингова моря. Это безлесная увалистая тундра с обширными озерно-болотными котловинами и увалами, высотой от 40 до 60 м, единично по обрамлению 200–500 м [Трегубов, Львов, 2014].

Многолетнемерзлые породы (ММП) мощностью от 100 до 250 м имеют сплошное распространение. Температура ММП изменяется в пределах –1,4...–4,5 °С. В строении сезонно-талого слоя (СТС), мощностью от 45 до 75 см, выделяется несколько слоев-горизонтов, отличных по строению и составу, условиям промерзания и оттайки. Верхнюю часть разреза образует ежегодно оттаивающий почвенный профиль (35–55 см). Под почвами залегает льдистый переходный слой мощностью 10–20 см, периодически оттаивающий в теплые и дождливые годы, а также под воздействием тундровых пожаров.

В ландшафте абсолютными доминантами являются типичные кочкарные кустарничково-мохово-пушицевые тундры плоских водоразделов и пологих

<sup>1</sup> ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило, вед. науч. сотр., канд. геол.-минер. н.; e-mail: tregubov2@yandex.ru

склонов, бугорковатые мохово-осоковые с низкорослыми ивами полосы стока и тундроболота озерных котловин. Менее распространены кустарничковые лишайниково-моховые и разнотравно-ерниковые тундры дренируемых склонов и водоразделов. В поймах рек и ручьев обычны мохово-осоковые и злаково-разнотравные ивняки и ольховники.

На большей части низменности распространены типичные тундровые торфянистые и торфянисто-перегонные оглеенные почвы, которые на увалах и их верхних склонах сменяются тундровыми иллювиально-гумусовыми, а в озерных котловинах гидроторфяными почвами. Типичными для почв низменности являются избыточное увлажнение, слабокислая – кислая реакция почвенных растворов (рН 4,7–6,5) и восстановительные условия, обуславливающие оглеение различных горизонтов. Минерализация почвенных растворов низкая 20–35 мг/л. По составу надмерзлотные воды СТС преимущественно гидрокарбонатно-кальциевые, обогащенные растворенными органическими веществами. Почвообразующими породами являются мерзлые суглинки, ледниковые и ледниково-морские осадки, обломочная кора выветривания базальтовых покровов.

Важным регулятором почвенных и, в целом, ландшафтных процессов является количество осадков, выпадающих в летний период. В описываемом районе за 10-летний период, предшествовавший исследованиям, в среднем за год выпадало 122 мм жидких осадков. Разброс количества выпавших осадков составил: 72 мм в засушливые и 205 мм в дождливые годы. В низменных тундрах количество осадков в летний период определяет высоту стояния зеркала надмерзлотных вод и соответственно вертикальную мощность геохимического ландшафта (15–100 см). В связи с этим к названию элементарных ландшафтов было присоединено дополнение «поверхностные» [Перельман, Касимов, 1999]. В настоящей работе это уточнение к определению ландшафтов не применяется.

Поступление химических элементов в ландшафт связано с выветриванием пород основного и среднего составов (Fe, Ca, Mn, Mo, Ag, Sn), с выщелачиванием суглинков (Ca, Fe, Mn, Mg), с разложением опада кустарничков и кустарников (Zn, Mn, B, Cu, Ca, Ba), дернины зеленых мхов и кустистых лишайников (Ag, Ca, Sn, Pb, Mn, Fe, Cr, Ni) [Трегубов, 1997; Трегубов, Тайсаев, 2012].

Объектами исследований являлись две площадки размером 100·100 м, получившие наименование Онемен и Дионисий, характеризующие ландшафтное разнообразие Анадырской низменности. Они входят в состав международной системы геоэкологического мониторинга [Трегубов, Львов, 2014]. Первая площадка представляет собой уплощенную вершину тундрового увала с пологими склонами и абсолютными высотами 18–20 м, покрытую климаксовой редко кочкарной кустарничковой мохово-пушицевой растительностью. Вторая площадка – горное подножье южной экспозиции с уклоном рельефа

1–4° и абсолютными высотами 145–150 м, западинами, торфяными буграми и пятнами-медальонами, парковой порослью кустарничковой ольхи, «травяными речками» и мохово-разнотравно-кустарничковыми крупными кочкарниками.

Более чем 20-летний мониторинг мощности и температуры СТС сопровождался изучением микрорельефа, растительного покрова, почвенных разрезов, экзогенно-криогенных процессов. В рамках настоящей работы использованы результаты измерений глубины сезонной оттайки по сетке 10·10 м, литогеохимической съемки, материалы инструментального нивелирования рельефа (20·20 м), ландшафтных исследований и описания почвенных профилей района, выполненные в разные годы.

Геохимические исследования предполагали площадное и вертикальное точечное опробование. По площади опробовался органо-минеральный материал с глубины 15–20 см с шагом 20 м. Вертикальное опробование почвенных горизонтов производилось трубчатым пробоотборником длиной 120 см и внутренним диаметром 38 мм. Пробоотборник забивался кувалдой на глубину сезонной оттайки, далее специальным поршнем керн выдавливался «столбиком» и опробовался в интервале глубин 10–15, 25–30, 40–45, 55–60 см. Для опробования почвенных профилей выбирались участки без проявлений криотурбирования и аномалий мерзлотного пучения, со средней по выборке глубиной протаивания. Пробы проходили стандартную для литогеохимии обработку, таблетировались для последующего рентгенофлуоресцентного анализа (Spectroscan-U). В твердом материале проб определялось валовое содержание Fe, Mn, Cu, Ni, Ti, Zn, Sr, Ca, Bi, Co, Se. Результаты анализов проходили стандартную статистико-математическую и графическую обработку с использованием программ Microsoft Excel и Surfer 8.0 (Kriging). Для статистической и графической обработки использовались данные аналитики по Fe, Mn, Cu, Zn, концентрации которых в 100% проб превышают предел обнаружения, а вариация содержаний по площадкам превышает 15%. Показатели кислотности – щелочности (рН) и минерализации (М, мг/л) определялись в верхнем увлажненном горизонте почв с помощью портативного рН-метра/солемера HI 9811 (HANNA).

В табл. приведены основные характеристики рельефа, деятельного слоя и геохимических условий верхних горизонтов почв.

Элементарные ландшафты картировались в соответствии с известными принципами геохимии ландшафтов [Богданова, Гаврилова, Герасимова, 2012]. Выделение радиальных и латеральных геохимических потоков выполнено по результатам инструментального нивелирования рельефа поверхности площадок и регулярным замерам глубины сезонного протаивания. В основе такого методического подхода, опирающегося на натурные наблюдения, лежит предположение, что инфильтрация наиболее выражена в условиях возвышенного рельефа с ровным мерзлотным водоупором и достаточной мощностью

Общая характеристика площадок

| Параметр<br>(число проб, точек измерений) | Онемен |       |        | Дионисий |       |      |
|-------------------------------------------|--------|-------|--------|----------|-------|------|
|                                           | $C_x$  | $C_v$ |        | $C_x$    | $C_v$ |      |
| Абсолютная высота, м (36)                 | 19,62  | 2     |        | 147,31   | 1     |      |
| Мощность сезонно-талого слоя, см (121)    | 52,0   | 9     |        | 59,7     | 21    |      |
| pH растворов (12)                         | 5,8    | 3     |        | 6,4      | 3     |      |
| Минерализация растворов, мг/л (12)        | 34     | 16    |        | 13       | 55    |      |
| Элемент                                   | $C_x$  | $A$   | $St$   | $C_x$    | $A$   | $St$ |
| Fe, % (36)                                | 1,9    | 0,75  | 0,8    | 4,9      | 0,39  | 3,2  |
| Mn, % (36)                                | 0,009  | 0,76  | 0,0077 | 0,12     | 1,99  | 0,06 |
| Cu, мг/кг (36)                            | 11,4   | −0,60 | 1,66   | 9,3      | 1,41  | 3,6  |
| Zn, мг/кг (36)                            | 11,3   | −0,39 | 3,15   | 9,6      | 1,15  | 4,1  |

Примечание.  $C_x$  – среднее арифметическое выборки,  $C_v$  – коэффициент вариации, %;  $A$  – коэффициент асимметрии;  $St$  – стандартное отклонение.

СТС, то есть в автономных элювиальных и элювиально-аккумулятивных ландшафтах. Напротив, боковая внутрисочвенная миграция проявлена в условиях существенного уклона поверхности мерзлотного водоупора, причем тем интенсивнее, чем меньше мощность СТС. В изученных объектах это трансэлювиальные, трансупераквальные, отчасти элювиально-аккумулятивные ландшафты. Водная миграция в супераквальных и аккумулятивно-элювиальных ландшафтах отличается периодическим характером, связана с обилием летних осадков и экзогенно-криогенными процессами.

Геохимические барьеры выделялись в соответствии с первым эмпирическим правилом концепции барьеров – «геохимические аномалии формируются на геохимических барьерах» [Геохимические ..., 2002, с. 3]. Радиальная геохимическая структура изучалась путем расчета для почвенных горизонтов коэффициентов концентрации и рассеяния (КК, КР) химических элементов индикаторов относительно их содержания в мерзлой материнской породе. Основой анализа пространственной геохимической структуры являлось выделение положительных и отрицательных аномалий, их соотношение с положением сопряженных элементарных ландшафтов. Контрастность латеральных аномалий характеризовалась коэффициентами концентрации и рассеяния, рассчитываемыми как отношение аномальных содержаний химических элементов к фоновым – средним значениям в выборке. При выделении радиальных и латеральных геохимических аномалий особое внимание уделялось сопряжению по вектору миграции отрицательных и положительных аномалий элементов индикаторов.

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 представлены схемы сопряжения элементарных ландшафтов с векторами уклона поверхности мерзлотного водоупора: от 0 до 5° на площадке Онемен и от 0 до 8,5° на площадке Дионисий.

На площадке Онемен, с посткриогенным рельефом (термокарстовым останцовым) зона доминирования радиальных потоков приурочена к вершине тундрового увала. Она находится в центральной

части площадки и имеет субширотное простирание. Ее обрамляют зоны проявлений латеральной миграции в поверхностном трансэлювиальном и трансупераквальном ландшафтах (рис. 1, А). В юго-восточной части располагается зона сопряжения трансупераквального и супераквального ландшафтов. Мощность СТС закономерно меняется от элювиального ландшафта (55–65 см) к супераквальному (50–40 см).

План ландшафтной структуры площадки Дионисий определяет общий юго-западный уклон рельефа и трансаквальный ландшафт в западной части, представляющий собой «травяную речку» – полосу поверхностного стока по сфагнумо-осоковым разреженным ивнякам [Трегубов, Львов, 2014]. Слабовыпуклый профиль склона осложнен солифлюкционными формами рельефа северного и северо-западного простирания. Таким же образом, полосами и языками изменяется глубина сезонного протаивания от 65–85 в положительных до 55–45 см в отрицательных формах микрорельефа. Участки иллювиирования почв радиальными потоками выявляются в северо-западной и восточной частях площадки (см. рис. 1, Б). Эти участки отнесены к элювиально-аккумулятивному ландшафту. В центральной и восточной части уклон 3–5° надмерзлотного водоупора свидетельствует об умеренной латеральной миграции в условиях трансэлювиального ландшафта. Полоса активной боковой внутрисочвенной миграции приходится на трансупераквальный ландшафт, протянувшийся по левому борту «травяной речки». В крайней юго-западной части можно выделить супераквальный ландшафт бугорково-мочажинного болота [Трегубов, Львов, 2014].

Следует отметить различия в рельефе поверхности и подошвы СТС. Величины уклона дневной поверхности площадок, определяющие интенсивность поверхностного стока, в 1,5–2 раза меньше и более выдержаны по простиранию, чем подошва надмерзлотного внутрисочвенного стока. Другой важный момент касается очевидной разницы в энергии рельефа площадок Онемен и Дионисий и более сложного ландшафтного устройства последней.

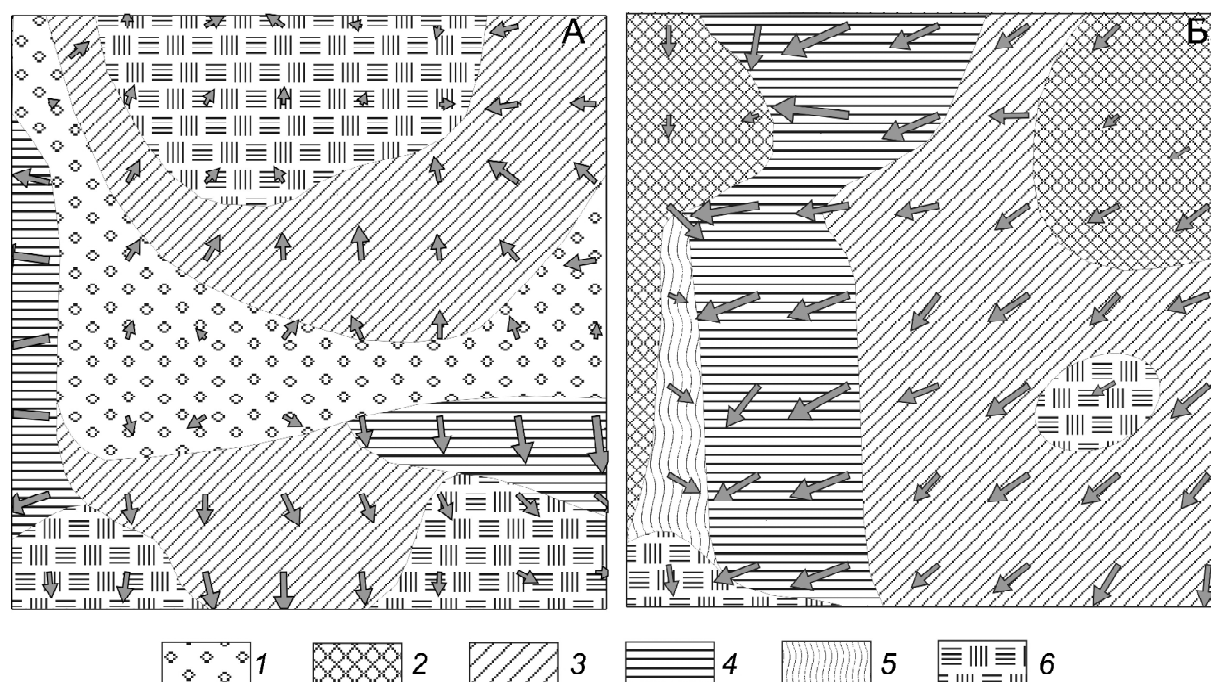


Рис. 1. Схема сопряжения элементарных ландшафтов на площадках Онемен (А) и Дионисий (Б): 1 – элювиальный; 2 – элювиально-аккумулятивный; 3 – трансэлювиальный; 4 – транссупераквальный; 5 – трансаквальный; 6 – супераквальный [Богданова, 2012].

Стрелками показаны векторы уклона надмерзлотного водоупора, размер стрелки показывает крутизну от 0 до 8,5 градусов

Fig. 1. Scheme of pairing elementary landscapes on the Onemen (A) and Dionisij (B) sites: 1 – eluvial; 2 – eluvial-accumulative; 3 – transeluvial; 4 – transsuperaquatic; 5 – transaquatic; 6 – superaquatic [Bogdanova, 2012]. Arrows indicate the line of slope of the overpermafrost waterproof layer, the size of arrows refers to the slope inclination (0–8,5 degrees)

Рассмотрим особенности пространственного распределения концентраций химических элементов, чтобы прояснить насколько и каким образом ландшафтное строение отражается на взаимодействии радиальных и латеральных потоков миграции вещества. Содержание типоморфных для ландшафта Анадырской низменности Fe и Mn в верхнем горизонте почв площадки Дионисий повышено по сравнению с площадкой Онемен в 2,6 и 1,3 раза соответственно (табл.). Содержание в почвах Zn и Cu, имеющих органогенное происхождение, на обеих площадках практически не меняется [Трегубов, 2012].

На площадке Онемен в центральной части, соответствующей автономному участку рельефа и элювиальному ландшафту внутри контуров выделяются положительные аномалии содержания Fe и Mn – 2,7 и 0,013% соответственно. Практически в этих же границах проходят изоконцентраты 9 и 10 мг/кг Zn и Cu, соответствующие их отрицательным аномалиям (рис. 2). Отрицательные аномалии Fe и Mn, положительные – Zn и Cu приурочены к границам трансэлювиального и аккумулятивно-супераквального ландшафтов на севере площадки. Подобные обратные соотношения положительных и отрицательных аномалий Mn, Zn и Cu прослеживаются на северо-западе и юге площадки. Антагонизм концентрации и рассеивания Fe, Mn, с одной стороны, и Zn, Cu – с другой, объясняется их различным геохимическим поведением в окислительных и восстановительных условиях. Контрастность аномалий невелика: КК –  $\text{Fe}_{2,0} \text{Mn}_{1,5} \text{Zn}_{1,5} \text{Cu}_{1,2}$ ; КР –  $\text{Fe}_{1,4} \text{Mn}_{2,2}$

$\text{Zn}_{2,3} \text{Cu}_{1,5}$ . Однако благодаря закономерному сочетанию и сопряжению аномалий различного знака геохимическая структура площадки прослеживается достаточно ясно.

На площадке Дионисий более четко выражен субмеридиональный план аномалий (рис. 3). К

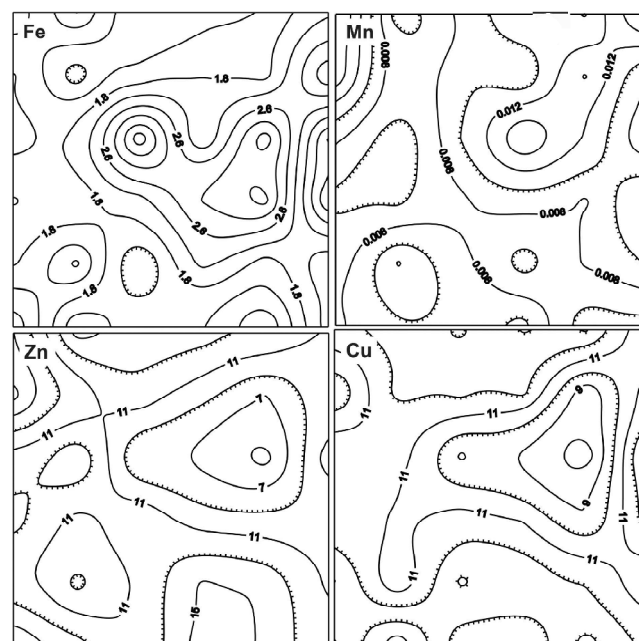


Рис. 2. Схема изоконцентрат Fe, Mn в процентах и Zn, Cu в мг/кг в почвах площадки Онемен

Fig. 2. Scheme of isoconcentrates of Fe and Mg (in %) and Zn and Cu (in mg/kg) in the soils of the Onemen

трансупераквальному ландшафту в левом борту травяной речки приурочены линейные положительные Zn, Cu аномалии (изоконцентраты 14 и 13 мг/кг), на которые накладываются полосы пониженных концентраций Fe и Mn (рис. 1, Б, 3). В восточной и северо-западной частях площадки выделяются площадные положительные аномалии Mn и Fe (изоконцентраты 0,18 и 7%). Им соответствуют зоны пониженных концентраций Zn и Cu. На этих участках, отнесенных к элювиально-аккумулятивным ландшафтам, отмечается выполаживание мерзлотного водоупора и увеличение мощности сезонной оттайки. На южной окраине площадки совмещение отрицательных аномалий Fe, менее Mn, и положительных Zn, Cu проявляется в зоне сопряжения трансаквального – супераквального и трансэлювиального – супераквального ландшафтов. Контрастность аномалий площадки Дионисий: КК –  $Fe_{2,0} Mn_{3,0} Zn_{2,0} Cu_{1,6}$ ; КР –  $Fe_{5,0} Mn_{6,0} Zn_{1,6} Cu_{1,6}$ . При близких с площадкой Онемен величинах коэффициентов положительных аномалий, отмечается интенсивный локальный вынос Fe и Mn. Большей частью это связано с отрицательными аномалиями, приуроченными к трансаквальному ландшафту.

Полученные результаты позволили предположить наличие окислительного барьера в автономных ландшафтах с пониженным и уплощенным мерзлотным водоупором. На участках резкого выполаживания уклона мерзлотного водоупора, то есть на сопряжении трансэлювиальных, трансупераквальных ландшафтов с супераквальным, выделяются глеевый, кислый и сорбционный барьеры. Fe, Mn, Zn и Cu, в достаточном количестве присутствующие в ландшафте и проявляющие противоположные свойства в отношении параметров окислительно-

восстановительных и кислотно-щелочных условий миграции и образования фульватных комплексов, позволяют идентифицировать и оконтурить эти геохимические барьерные зоны в пространстве.

Остается невыясненным вопрос о положении и механизме формирования радиальных геохимических барьеров и соответствующих им геохимических аномалий. Рассмотрим распределение химических элементов в почвенных профилях элювиального (элювиально-аккумулятивного), трансэлювиального (трансупераквального) и супераквального ландшафтов (рис. 4). Сделана попытка обобщения и типизации почвенных профилей, характеризующих местоположение литохимических аномалий и отражающих взаимодействие радиальных и латеральных геохимических потоков. Напротив каждого генетического горизонта линейчатыми диаграммами показаны коэффициенты рассеяния (КР – влево) и концентрации (КК – вправо) в диапазоне величин 1–3. В правой части указаны предполагаемые классы геохимических барьеров [Перельман, Касимов, 1999].

Для субэрадных условий характерны тундровые иллювиально-гумусовые и торфянисто-перегнойные почвы. В разрезе выделяются две контрастные геохимические аномалии, приуроченные к перегнойному ( $A_1$ ), иллювиальному илистому, насыщенному фульватным гумусом (Bh,g) горизонтам. В профиле выделены окислительный, глеевый и термодинамический барьеры. Максимум коэффициента концентрации Mn и Fe, соответственно 2,3 и 2,6 – приходится на окислительный барьер в поверхностном слое почв. Cu и Zn концентрируются (КК 2,2 и 2,4) в иллювиальном горизонте на глеевом и предположительно сорбционном барьере. В период наибольшей оттайки увлажнены верхняя часть профиля (OAv;  $A_1$ ) и горизонт на фронте сезонной оттайки (Bh,g). Преобладает радиальная нисходящая и восходящая миграция. На разрывах оплывин видны пятна ожелезнения торфянистого материала.

Второй, переходный профиль еще сохраняет иллювиально-гумусовый характер, но приобретает черты тундровых грубогумусовых почв за счет формирования торфянистого горизонта ( $O_2$ ) и сокращения элювиальной части профиля. Радиальные геохимические потоки при полной оттайке проявляются, но преобладает боковой почвенный вынос и привнос вещества в супесчаном перегнойном ( $A_1$ ) и надмерзлотном горизонтах (Bh, g). По сравнению с иллювиально-гумусовым профилем мощность иллювиального горизонта здесь уменьшается на участках крутого уклона мерзлотного водоупора и, наоборот, увеличивается при его выполаживании. Рассеяние Cu и Zn в 1,3–1,4 раза отмечается в супесчаном перегнойном горизонте ( $A_1$ ), а концентрирование, такое же по величине – в иллювиальном. Здесь же прослеживается антагонизм пар Fe-Mn и Zn-Cu в накоплении и рассеянии.

Для супераквальных условий типичен профиль тундровых оглеенных грубогумусовых и гидроторфя-

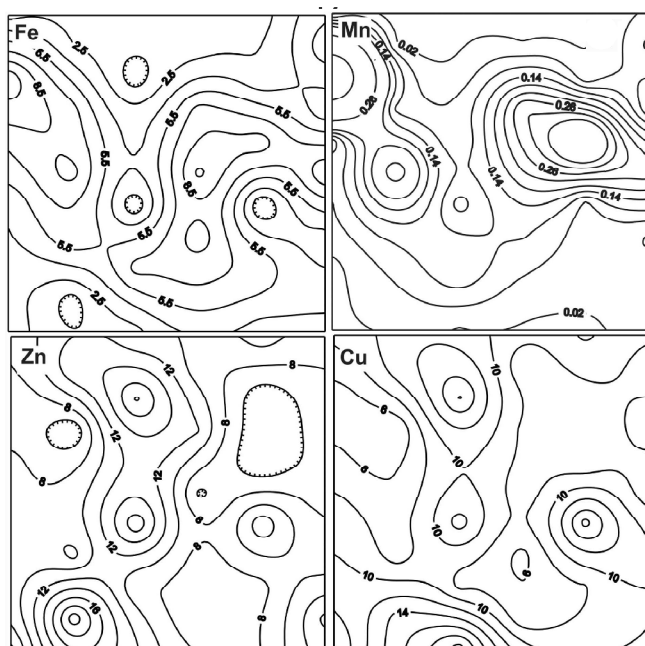


Рис. 3. Схема изоконцентрат Fe, Mn в % и Zn, Cu в мг/кг в почвах площадки Дионисий

Fig. 3. Scheme of isoconcentrates of Fe and Mg (in %) and Zn and Cu (in mg/kg) in the soils of the Dionisiy

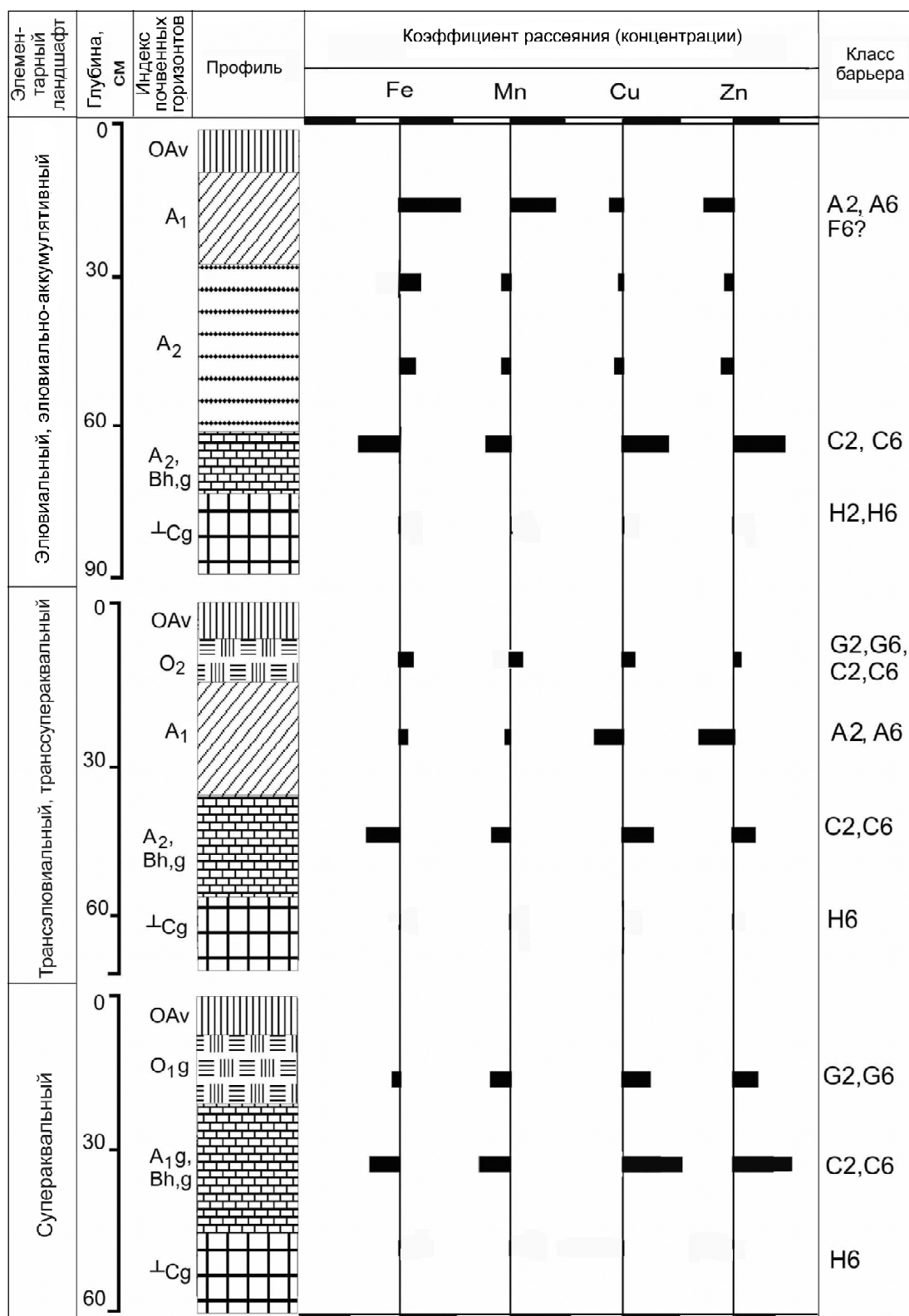


Рис. 4. Результаты анализа геохимической дифференциации почв элементарных ландшафтов площадки Онемен (цена деления шкалы КК, КР – 1,5)

Fig. 4. The results of analysis of the geochemical differentiation of soils for elementary landscapes of the Onemen site (scale graduation value for KK and KP is 1,5)

ных почв. Профиль морфологически не дифференцирован. В известных описаниях тундровых почв обычно выделяют трехчленный профиль ( $O_{1v}$ - $O_2g$ - $\wedge Cg$ ) из живой мохово-осоковой дернины, торфянистого глеевого и минерального мерзлого горизонтов

[Единый ..., 2014]. По нашим данным, надмерзлотный торфянистый слой делится на верхний торфянистый и нижний иллювиально-гумусовый горизонты. Они в различной степени насыщены черным илистым материалом и обогащены микроэлементами

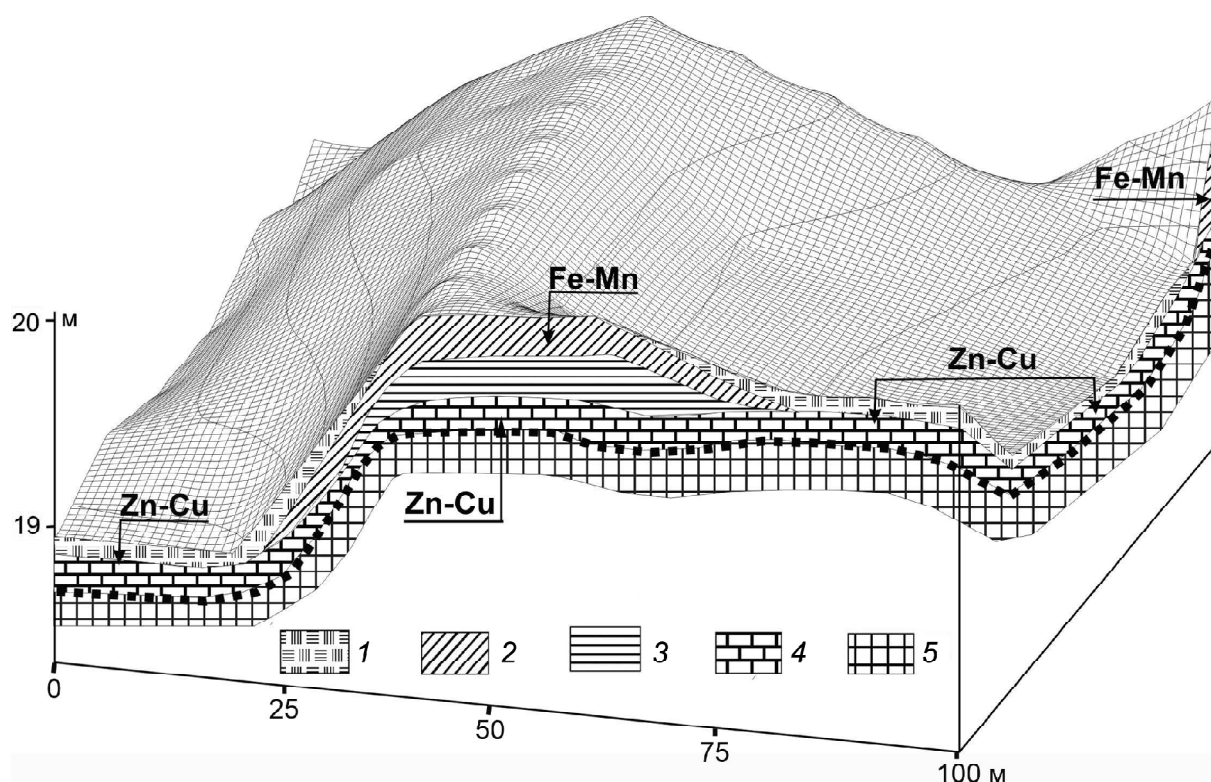


Рис. 5. Концептуальная 3d модель сопряжения радиальных и латеральных геохимических барьеров в ландшафтах площадки Онемен ( $z:x,y = 1:20$ ): 1 – торфянистый горизонт ( $O_2$ ;  $O_1$ , g); 2 – органо-минеральный, перегнойный горизонт ( $A_1$ ) с радиальным окислительным барьером ( $A_2$ ;  $A_6$ ), 3 – минеральный супесчано-суглинистый горизонт с признаками оподзоливания ( $A_2$ ), радиальный окислительный барьер ( $A_6$ ); 4 – органо-минеральный и минеральный илестый, насыщенный фульватным гумусом, оглеенный иллювиальный горизонт (Bh, g) радиальный и латеральный глеевый, сорбционный барьер ( $C_2$ ,  $C_6$ ,  $G_2$ ,  $G_6$ ); 5 – мерзлый льдистый горизонт, водоупор ( $^Cg$ ), термодинамический барьер ( $H_2$ ,  $H_6$ )

Fig. 5. Conceptual 3d-model of pairing radial and lateral geochemical barriers in the landscapes of the Onemen site ( $z: x,y = 1:20$ ): 1 – peaty horizon ( $O_2$ ;  $O_1$ , g); 2 – organic-mineral humus horizon ( $A_1$ ) with radial oxidizing barrier ( $A_2$ ;  $A_6$ ), 3 – mineral sandy clay – clay loam horizon with podzolization features ( $A_2$ ), radial oxidizing barrier ( $A_6$ ); 4 – organic-mineral and mineral silty, – saturated with fulvate humus, gleyic illuvial horizon (Bh, g) radial and lateral gley sorption barrier ( $C_2$ ,  $C_6$ ,  $G_2$ ,  $G_6$ ); 5 – frozen icy horizon, aquiclude ( $^Cg$ ), thermodynamic barrier ( $H_2$ ,  $H_6$ )

ми (рис. 4). Иллювиальный горизонт в большей степени формируется за счет бокового привноса вещества из трансупераквального ландшафта и осадения элементов на глеевом и сорбционном барьере. Коэффициент концентрирования здесь Zn, Cu достигает 2,5 раз, а Fe и Mn находятся в рассеянном состоянии. Радиальная миграция ограничена временем редких засушливых периодов. В целом же для почв характерен застойный режим надмерзлотных вод, который периодически нарушается сбросом воды по термокартово-термозрозионным канавам.

Интеграция радиальных и латеральных геохимических структур позволяет перейти на новый уровень геохимического анализа – создание трехмерных моделей геохимических барьеров. Объемные модели позволяют проследить взаимоотношение радиальных и латеральных поверхностных и внутрипочвенных геохимических потоков, более полно рассмотреть морфологию геохимических барьеров. В качестве объекта 3-d моделирования рассмотрим площадку Онемен с более ровным рельефом и однородным ландшафтом (рис. 5).

Элементарные ландшафты и характеристики почв обсуждены нами ранее, поэтому обратимся к

условиям залегания геохимических барьеров и приуроченных к ним геохимических аномалий. Окислительный барьер с положительной Fe-Mn аномалией имеет типичную форму «железной шляпы», ограниченной снизу и по флангам восстановительными условиями оглеенных горизонтов почв. Мощность зоны окисления в куполе достигает 0,4 м, она охватывает перегнойный ( $A_1$ ) и верхнюю часть минерального ( $A_2$ ) горизонтов. Образование аномалий Fe-Mn происходит при участии радиальных потоков, как по типу формирования остаточных кор выветривания, так и за счет восходящей миграции глеевых вод к поверхностной зоне окисления и испарения летом и к верхнему фронту промерзания в осенний период. Источником вещества являются почвообразующие породы.

Сложным залеганием и механизмом функционирования характеризуется комплексный глеевый – кислый – сорбционный барьер, приуроченный к иллювиальному горизонту (Bh, g;). В плане и в разрезе он повторяет контуры кровли ММП, уменьшая мощность и выклиниваясь на бровках склона с крутым уклоном мерзлотного водоупора (рис. 5). В субэрадных условиях глубина залегания барьера 0,5–0,3 м, мощность – 0–0,25 м. В подчиненных лан-



дшафтах, с увеличением мощности до 0,35–0,45 м он проецируется на поверхность в виде Zn-Cu аномалий. Сплошность барьера нарушается локально, причем не только в пространстве, но и во времени. Кроме участков с крутым уклоном мерзлотного водоупора это может происходить за счет наложения на супераквальный трансаквальный ландшафта, как, например, в границах «травяной речки» площадки Дионисий (рис. 1, Б).

В формировании Zn-Cu аномалий участвуют радиальные и латеральные потоки нейтральных и слабокислых глеевых, насыщенных фульвокислотами и металлоорганическими комплексами надмерзлотных вод. Насыщенность органо-минеральными коллоидными частицами позволяет рассматривать внутрипочвенные воды как гидрозоли, транспортирующая способность которых значительно выше по сравнению с истинными растворами [Добровольский, 2009]. Граница смены радиального и латерального режимов зависит от обилия осадков, обычно бывает резкой на бровках выпуклого склона или постепенной на пологих и вогнутых склонах. Контрастность проявления радиальных барьеров осаждения Zn и Cu превышает таковую для латеральных аномалий, однако по количеству накопленного вещества супераквальный ландшафт многократно опережает иллювиальный горизонт субаэральных ландшафтов. Во внедренных супераквальных ландшафтах, на подножиях протяженных в несколько километров склонов увалов с разнообразным и динамичным растительным покровом, уровень концентрации Cu и Zn может превышать описанный для площадки Онемен в 2,5–4 раза. Случаи обнаружения «ложных ореолов» Zn, Cu, Mo на заболоченных террасах в практике литохимических поисков полезных ископаемых широко известны.

Трехмерное моделирование позволяет по-иному подойти к оценке емкости геохимических барьеров. Известна практика такой оценки с применением коэффициентов концентрации барьеров, с указанием мощности почвенных горизонтов – радиальных барьеров [Герасимова, Богданова, 2013]. В геохимии окружающей среды емкость характеризуется максимальным количеством вещества, которое может удерживаться геохимическим барьером без нарушения его структурных и функциональных свойств [Глазовская, 2012; Трифонова, 2005]. Под емкостью сорбционного барьера понимается полная катионообменная емкость поглощающего комплекса почв, дисперсных осадков, цеолитсодержащих горных пород [Никашина, Серова, Кац, 2010]. Емкость кислого барьера пахотных почв оценивают потребностью в их известковании, искусственного щелочного барьера на пути кислых техногенных потоков – количеством карбонатов, необходимых для их полной нейтрализации. Соответственно единицами измерения емкости являются: мг-экв или мг иона на 100 г материала сорбционного барьера; кг извести на гектар пашни с кислой реакцией; тонн карбонатного сырья на 10 м длины ис-

кусственного фильтрационного сооружения (щелочного барьера).

Предпосылкой для оценки емкости окислительного и комплексных барьеров площадки Онемен по Fe и Zn может быть допущение, что геохимический ландшафт климаксовых кочкарных тундр достиг равновесного состояния; условий, когда при наличии устойчивого многолетнего потока этих металлов, емкость барьеров полностью реализована. В этом случае для оценки их емкости по Fe и Zn необходим подсчет запасов этих металлов в объеме радиальной и латеральной частей барьеров элементарных ландшафтов.

Технически это можно выполнить, воспользовавшись методикой подсчета запасов полезных ископаемых – геометризации геологических блоков [Букринский, 2002]. Объем блока устанавливается как произведение площади, замеренной по проекции геохимического барьера – почвенного горизонта, на среднюю его мощность, тоннаж материала барьера – умножением объема на объемную плотность, а запасы металлов – исходя из вычисленного среднего их содержания:

$$V_i = S_i \times h_i, \quad (1)$$

$$M_i = V_i \times \rho_v, \quad (2)$$

$$P_i = M_i \times C_i, \quad (3)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4)$$

где  $V_i$  – объем блока;  $S_i$  – площадь проекции барьера в блоке;  $h_i$  – средняя мощность барьера (почвенного горизонта);  $M_i$  – масса материала барьера;  $\rho_v$  – объемная плотность почвенного горизонта в блоке;  $C_i$  – среднее содержание химического элемента в блоке;  $P_i$  и  $P$  – запасы химического элемента в блоке и геохимическом барьере в целом (емкость барьера).

Расчеты по окислительному барьеру площадки Онемен, который выделен единым блоком и приурочен к иллювиальному ландшафту, дают объем 560 м<sup>3</sup> (рис. 1, А), что при объемной плотности (удельный вес) перегнойного горизонта 0,4 т/м<sup>3</sup> даст массу в 224 т. Запасы Fe на окислительном барьере площадки при средней концентрации 2,8% по массе составят 6,3 т.

Комплексный барьер, приуроченный к иллювиальному горизонту и супераквальному ландшафту в границах площадки Онемен, разбит на 2 блока. Первый блок по площади охватывает проекцию иллювиального горизонта почвенного профиля вершины увала, имеет объем порядка 300 м<sup>3</sup>, что при объемной плотности 1,6 т/м<sup>3</sup> составит 480 т. Запасы Zn в этом блоке составят при средней концентрации металла 0,0012% – 5,8 кг. Второй блок включает выделы супераквальных ландшафтов на севере и на юге площадки общей площадью 2500 м<sup>2</sup> и объемом 1125 м<sup>3</sup> (рис. 1, А). При средней объемной



плотности органо-минеральных горизонтов  $0,8 \text{ т/м}^3$  масса материала барьера составит 900 т, а запасы Zn 10,8 кг. В сумме запасы Zn по двум блокам – емкость по Zn комплексного кислого, глеевого, сорбционного барьеров в границах площадки Онемен составит 16,6 кг.

#### Выводы:

– в низменных тундрах Чукотки с мелким типом протаивания взаимодействие радиальных и латеральных геохимических потоков осуществляется в СТС на сопряжении элювиального с трансэлювиальным и трансупераквальным ландшафтами. Интенсивность взаимодействия потоков определяется уклоном мерзлотного водоупора и глубиной сезонной оттайки;

– для Анадырской тундры типичными являются радиальные и латеральные окислительный и глеевый сорбционный геохимические барьеры, приуроченные в плане к элювиальным и супераквальным ландшафтам; в разрезе – к верхним органо-минеральным, минеральным горизонтам и нижнему надмерзлотному иллювиальному горизонту почв;

– индикаторами геохимических барьеров Анадырских тундр являются Fe, Mn, Zn, Cu, которые

активно мигрируют в составе внутрипочвенных коллоидных растворов и содержатся в тундровых почвах в достаточной для аналитического определения концентрации. Педогеохимические аномалии элементов могут быть использованы для картографирования почв и идентификации почвенных процессов;

– в трехмерном пространстве надмерзлотного слоя тундровых ландшафтов радиальные и латеральные барьеры и соответствующие им геохимические аномалии образуют единые педологические тела, морфология которых определяется рельефом дневной поверхности и мерзлотного водоупора. Педологические тела характеризуются элементами залегания, временной (сезонной, многолетней) динамикой. Накопленные в ненарушенных природных условиях в педологическом теле геохимического барьера запасы химического элемента-индикатора отражают его емкостные характеристики;

– подход к геохимическим барьерам как геологическим телам в трехмерном пространстве требует разработки дополнительных параметров, характеризующих мощность, линейные размеры и емкость барьеров.

**Благодарности.** Автор признателен старшему инженеру К.К. Уяганскому за профессиональный отбор и подготовку проб; технику Т.В. Никифоровой – за тщательный анализ проб.

Работа выполнена при финансовой поддержке международной программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring, грант NSF OPP-9732051 и OPP-0225603).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2012. № 1. С. 23–28.

Букринский В.А. Геометрия недр. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 549 с.

Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / Под ред. Н.С. Касимова, А.Е. Воробьева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 395 с.

Герасимова М.И., Богданова М.Д. Мелкомасштабные карты геохимических барьеров // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 9–17.

Глазовская М.А. Геохимические барьеры в почвах равнин, их типология, функциональные особенности и экологическое значение // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2012. № 1. С. 8–14.

Глазовская М.А. Почвы мира. Основные семейства и типы почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 231 с.

Добровольский В.В. Геохимия почв и ландшафтов. Избр. тр. М.: Научный мир, 2009. Т. II. 735 с.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный ин-т им В.В. Докучаева, 2014. 768 с.

Никашина В.А., Серова И.Б., Кац Э.М. Геохимические барьеры на основе клиноптилолитосодержащих туфов для решения экологических задач // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. Вып. 6. С. 949–959.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 764 с.

Трегубов О.Д. Геохимическая индикация иллювиального процесса тундровых почв // Современные проблемы загрязнения почв. Сб. матер. IV Межд. научной конференции 27–31 мая 2013. М.: МГУ, Факультет почвоведения, 2013. С. 181–185.

Трегубов О.Д. Геохимия урбанизированных ландшафтов Чукотки. Магадан: МПО СВНЦ ДВО РАН, 1997. 120 с.

Трегубов О.Д., Львов А.П. Репрезентативность наблюдений глубины сезонной оттайки в тундровых ландшафтах // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11. № 5. С. 89–99.

Трегубов О.Д., Тайсаев Т.Т. Введение в геохимию аллелопатии на примере тундровых фитоценозов // Вестник Северного (Арктического) университета. Сер. Естественные науки. 2012. № 4. С. 28–40.

Экологическая геохимия: словарь-справочник / Авторы-составители: Т.А. Трифонова, Л.А. Ширкин. Владимир: Ред.-издат. комплекс ВлГУ, 2005. 140 с.

Поступила в редакцию 20.08.2015  
Принята к публикации 09.02.2017

O.D. Tregubov<sup>1</sup>GEOCHEMICAL BARRIERS IN SOILS  
AND LANDSCAPES OF THE ANADYR TUNDRA

The interaction of radial and lateral subsurface geochemical fluxes on the pairing elementary landscapes of the lowland tundra is analyzed. Two typical Anadyr lowland urochishches were examined to describe the structure of geochemical landscapes and tundra soils, and the concentrations of Fe, Mn, Zn, and Cu within the area and along the section. The regularities and specific features of the location of low and high geochemical anomalies in correlation with oxidative, gleyic and sorption barriers in soil and landscape are revealed. It was concluded that the radial and lateral geochemical barriers form united geological bodies in landscapes. Their morphology depends on the topography of the impermeable permafrost horizon.

**Key words:** geochemical flows, cryosols, active layer, tundra, geochemical anomalies.

**Acknowledgements.** The author is grateful to the senior engineer K.K. Uyagansky for highly-professional sampling and sample preparation, and technician N.V. Nikifirova for the careful analysis of samples. The study was financially supported by the CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) international program (grants NSF OPP-9732051 и OPP-0225603).

## REFERENCES

- Bogdanova M.D., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I.* Elementarnye landshafty kak obekty landshaftno-geohimicheskogo kartografirovaniya [Elementary landscapes as objects of landscape-geochemical mapping] // *Geografija i prirodnye resursy*. 2012. № 1. S. 23–28 (in Russian).
- Bukrinskij V.A.* Geometriya neдр [The geometry of underground]. M.: Izd-vo MGGU, 2002. 549 s. (in Russian).
- Geohimicheskie bar'ery v zone gipergenezisa / Pod red. N.S. Kasimova, A.E. Vorob'eva* [Geochemical barriers in the supergene zone / Under the editorships of N.S. Kasimov, A.E. Vorobiev]. M.: MGU, 2002. 395 s. (in Russian).
- Gerasimova M.I., Bogdanova M.D.* Melkomasshtabnye karty geohimicheskikh bar'erov [Small-scale maps of geochemical barriers] // *Geografiya i prirodnye resursy*, № 3, 2013. S. 9–17 (in Russian).
- Glazovskaya M.A.* Geohimicheskie bar'ery v pochvah ravnin, ih tipologiya, funktsional'nye osobennosti i ekologicheskoe znachenie [Geochemical barriers in soils of the plains, their types, functional characteristics and ecological value] // *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografiya*, 2012. № 1. S. 8–14 (in Russian).
- Glazovskaya M.A.* Pochvy mira. Osnovnye semejstva i tipy pochv [Soils of the world. Basic families and soil types]. M.: MGU, 1972. 231 s. (in Russian).
- Dobrovolsky V.V.* Geohimija pochv i landshaftov. Izbrannyye trudy [Geochemistry of soils and landscapes]. M.: Nauchnyy mir, 2009. T. II. 735 s. (in Russian).
- Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennykh resursov Rossii [The unified state register of soil resources of Russia]. Versiya 1.0. Kollektivnaya monografiya. M.: Pochvennyy institut im V.V. Dokuchaeva Rossel'hozakademii, 2014. 768 s. (in Russian).
- Nikashina V.A., Serova I.B., Kac E.H.M.* Geohimicheskie bar'ery na osnove klinoptilolitsoderzhashchikh tufov dlya resheniya ekologicheskikh zadach [Geochemical barriers on the basis of tufts for solving environmental problems] // *Sorbtsionnye i hromatograficheskie processy*. 2010. T. 10. Vyp. 6. S. 949–959 (in Russian).
- Perel'man A.I., Kasimov N.S.* Geohimija landshafta. [Landscape geochemistry]. M.: Astreya-2000, 1999. 764 s. (in Russian).
- Tregubov O.D.* Geohimicheskaya indikatsiya illjuvial'nogo processa tundrovyykh pochv [Geochemical indication of illuvial process in tundra soils] // *Sovremennyye problemy zagryazneniya pochv. Sb. mater. IV Mezhdunar. nauchnoy konf. 27–31 maja 2013. M.: MGU, Fakul'tet pochvovedeniya*. 2013. S. 181–185 (in Russian).
- Tregubov O.D.* Geohimija urbanizirovannykh landshaftov Chukotki [Geochemistry of urban landscapes of Chukotka]. Magadan: MPO SVNC DVO RAN, 1997. 120 s. (in Russian).
- Tregubov O.D., Lvov A.P.* Reprezentativnost' nablyudenij glubiny sezonnoy ottajki v tundrovyykh landshaftah [The representativity of observations on the depth of seasonal defrost in tundra landscapes] // *Vestnik SVFU*. 2014. T. 11. № 5. S. 89–99 (in Russian).
- Tregubov O.D., Taysaev T.T.* Vvedenie v geohimiyu allelopatii na primere tundrovyykh fitocenozov [Introduction to the geochemistry of allelopathy by the example of tundra phytocenosis] // *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) universiteta. Ser. Estestvennye nauki*. 2012. № 4. S. 28–40 (in Russian).
- Ekologicheskaya geohimija: slovar'-spravochnik [Environmental Geochemistry: Dictionary] / Avtory-sostaviteli: T.A. Trifonova, L.A. Shirkin. Vladimir: Red.-izdat. kompleks VIGU, 2005. 140 s. (in Russian).

Received 20.08.2015

Accepted 09.02.2017

<sup>1</sup> Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology and Mineralogy; e-mail: tregubov2@yandex.ru