

УДК 551.482.212

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Савичев О.Г., Домаренко В.А.

Томский политехнический университет, Томск, e-mail: OSavichev@mail.ru

Разработана и апробирована математическая модель изменения химического состава донных отложений рек в зависимости от площади водосбора и слоя водного стока. На основе этой модели предложена методология поисков полезных ископаемых, месторождения которых формируются в междуречьях рек в зоне гипергенеза при активном участии гидрологических процессов. Основная концепция методологии заключается в выявлении участков с одноразовым и устойчивым изменением интенсивности водообмена (а именно – её уменьшением) и последующем их изучении. В соответствии с этой концепцией основные этапы поисков полезных ископаемых включают: 1) выделение по картам и космоснимкам малопригодных участков рек с относительно резким снижением интенсивности водообмена; 2) проведение выборочного опробования речных отложений (2–3 пробы); 3) приближённая оценка расчётным методом содержания элементов в истоках рек и выделение геохимических аномалий; 4) проведение детальных исследований выделенного района.

Ключевые слова: донные отложения рек, химический состав, пространственные изменения, поиски полезных ископаемых

LAWS OF CHANGE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF RIVER SEDIMENTS AND THEIR USE IN SEARCHES OF MINERALS

Savichev O.G., Domarenko V.A.

Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: OSavichev@mail.ru

The mathematical model of change of a chemical composition of river sediments is developed and approved depending on the area of a river basin and a layer of a water flow. On the basis of this model the methodology of mineral searches is offered. A condition of application of methodology – deposits of minerals are formed on watersheds of the rivers in a supergene zone at active participation of hydrological processes. The basic concept of methodology consists in revealing sites with disposable and steady change of intensity of water exchange (namely – its reduction) and their subsequent studying. Thus the basic stages of searches of minerals include: 1) allocation on maps and remote data of sites of the rivers with rather sharp reduction in intensity of water flow and without tributaries; 2) carrying out of selective approbation of river sediments (2–3 tests); 3) the approached estimation a settlement method of contents of elements in river heads and allocation of geochemical anomalies; 4) carrying out of detailed researches of the allocated area.

Keywords: river sediments, chemical composition, spatial changes, searches of minerals

Анализ геохимического состояния донных отложений поверхностных водных объектов достаточно широко используется как при проведении поисков полезных ископаемых, так и при оценке состояния окружающей среды, что закономерно обусловило заметный интерес к исследованию генезиса донных отложений и их химического состава со стороны специалистов самого различного профиля – гидрологов, геоморфологов, геохимиков, геоэкологов, биологов. В частности, в области геохимии донных отложений рек и озёр в последние годы были выполнены крупные обобщения Е.П. Яниным [13, 14], М.В. Мартыновой [4], В.Д. Страховенко [11] и рядом других авторов, а изучение донных отложений водных объектов уже достаточно давно является неотъемлемым элементом методологии геолого-разведочных и геоэкологических работ [3, 12].

Тем не менее требуется дальнейшее её совершенствование с учётом гидрологических моделей, что и определило цель рассматриваемой работы – разработку методики изучения пространственных изменений химического состава донных отложений рек как основы повышения эффективности поисков полезных ископаемых. В качестве объектов исследования выбраны малые водотоки как наиболее оптимальные индикаторы геохимических аномалий. Исходными данными послужили результаты работ, выполненных в 1990–2010 гг. авторами в Западной и Восточной Сибири [2, 7–9].

Математическая модель изменения химического состава донных отложений малых водотоков

Базовое уравнение, описывающее изменение концентрации вещества C в одномерном потоке во времени t и вдоль пространственной координаты x , имеет вид:

$$\frac{\partial(C \cdot w)}{\partial t} + \frac{\partial(C \cdot Q)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot w \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + f(C), \quad (1)$$

где w – площадь сечения потока, m^2 ; Q – расход воды, m^3/c ; D – коэффициент продольной дисперсии, m^2/c ; $f(C)$ – функция, описывающая поступление и трансформацию вещества в потоке, например, пропорционально концентрации:

$$f(C) = -k_c \cdot C \cdot w, \quad (2)$$

где k_c – коэффициент трансформации вещества, c^{-1} .

Уравнения (1), (2) применимы при анализе изменений содержаний как растворенного и взвешенного вещества непосредственно в водной среде, так и химического состава донных отложений [1]. Применительно к расчётным периодам геологического масштаба в первом приближении можно использовать упрощённую модель распро-

странения вещества преимущественно за счёт адвективного переноса в виде:

$$\frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial(C \cdot Q)}{\partial x} = -k_c \cdot C \cdot \frac{w}{Q}. \quad (3)$$

В части решения уравнения (3) предположим, что, во-первых, водосбор реки площадью F можно представить как часть кругового кольца внутри сектора с центральным углом β , радиусом L , равным сумме расстояний от дуги сектора до начала выраженного русла водотока $L(0)$, от замыкающего створа водотока шириной B' до начала сектора $L(2)$ и длины реки $L(1)$. Во-вторых, движение водных масс происходит от дуги сектора по направлению к точке O (рис. 1).

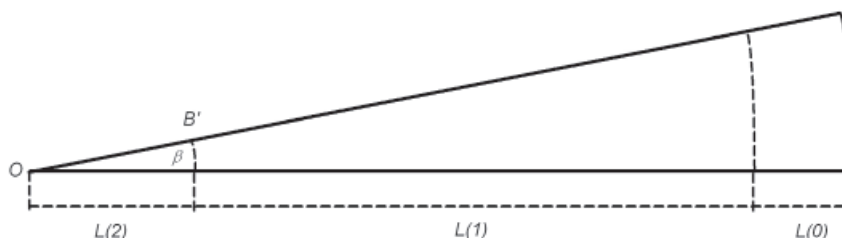


Рис. 1. Схема представления речного водосбора как части кругового кольца: β – центральный угол сектора; B' – ширина водотока в замыкающем створе; $L(0)$ – средняя длина участка водосбора от его внешней границы до начала постоянного русла; $L(1)$ – длина водотока; $L(2)$ – расстояние от замыкающего створа до начала сектора

Тогда площадь распространения волны F от источника на границе водосбора примерно описывается уравнением (4), площадь условного сечения водного потока w на расстоянии x от центра дуги – уравнением (5), а расход воды – уравнением (6).

$$F = \frac{\pi}{360} \cdot \beta \cdot (2 \cdot L \cdot x - x^2); \quad (4)$$

$$w = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot k_y \cdot Y \cdot \beta \cdot (L - x); \quad (5)$$

$$Q = \frac{a \cdot \pi}{T \cdot 360} \cdot Y \cdot \beta \cdot (2 \cdot L \cdot x - x^2), \quad (6)$$

где Y – слой водного стока, мм; k_y – коэффициент перехода от слоя стока к условной средней глубине потока; a – коэффициент размерности; T – расчётный период, с; $\pi \approx 3,14$; центральный угол β (в градусах) определяется по данным о морфометрических характеристиках водотока и его водосбора:

$$\beta = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{(F - B' \cdot (L(0) + L(1)))}{(L(0) + L(1))^2}. \quad (7)$$

С учётом (4–6) уравнение (3) принимает вид (8), а его аналитическое решение – (9):

$$\frac{\partial C}{\partial x} + \left(\frac{1}{Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{2 \cdot (L - x)}{2 \cdot L \cdot x - x^2} \cdot (1 + \eta) \right) \cdot C = 0; \quad (8)$$

$$C = C_0 \cdot \frac{Y_0}{Y} \cdot \left(\frac{F_0}{F} \right)^{1+\eta}, \quad (9)$$

где $\eta = \frac{k_y \cdot k_c \cdot T}{a}$; C_0 и Y_0 – концентрация вещества и слой водного стока в истоках реки (участок водосбора без выраженного русла).

Очевидно, что величина $1 + \eta$ может быть определена при сравнении концентраций C_1 и C_2 , а затем (при допущении $Y \approx Y_0$) по формуле (10) и полученным данным в первом приближении оценивается среднее содержание вещества C_0 , что позволяет оптимизировать процесс планирования поисковых и геолого-разведочных работ и повысить их эффективность.

$$C_0 = C \cdot \frac{Y}{Y_0} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{1+\eta}. \quad (10)$$

Другой способ использования уравнения (9) связан с анализом условий аккумуляции вещества в русловом аллювии и почвенном покрове с учётом фактического распределения по водосбору слоя водного стока.

Апробация модели и обсуждение результатов исследования

Основная апробация модели (9) выполнена по данным о химическом составе донных отложений малого водотока в междуречье рек Ангара и Подкаменная Тунгуска (Красноярский край). В геологическом строении водосбора этого водотока участвуют отложения палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. Нижнепалеозойская карбонатно-песчаниковая толща прорвана основными породами формаций сибирских траппов. На размытой поверхности нижнепалеозойских отложений залегают терригенные образования каменноугольной системы с размывом, перекрывающиеся рыхлыми образованиями палеогеновой и неогеновой систем. В нижнем течении рек распространены четвертичные отложения [2, 10]. В 2008 г. были прове-

дены комплексные геоэкологические исследования данной территории [9], в ходе которых с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой были изучены образцы донных отложений малого водотока на расстоянии 25, 27, 28 и 44 км от начала постоянного русла (площади водосбора соответственно: 203, 304, 315 и 430 км²), отражённого на карте масштаба 1:100000 [5]. Результаты определения концентраций ряда химических элементов и площади участков водосбора, в замыкающих створах которых отбирались пробы, приведены в таблице.

Анализ результатов исследований показал, что в пространственном изменении химического состава донных отложений по мере нарастания площади водосбора явственно проявляются тенденции уменьшения концентраций Fe, Cr и Ni, а в изменении Au и Pb – тенденции уменьшения; колебания Cu и Zn более хаотичны. При этом следует отметить, что зависимость между концентрацией изученных элементов в донных отложениях и речных водах не выявлена (рис. 2).

Расчётная и измеренные концентрации химических элементов в донных отложениях малого водотока в междуречье рек Ангара и Подкаменная Тунгуска, мг/кг

Химический элемент	Расчётная концентрация C_0 при $F_0 = 80 \text{ км}^2$	Площадь водосбора, км ²			
		203	304	315	430
Cr	1498	393	220	288	155
Fe	244682	85167	53890	74885	50175
Ni	182	82	58	63	47
Au	0,0026	0,0028	0,0029	0,0028	0,0033
Pb	3,3	7,4	10,5	6,4	15
Cu	97	55	43	62	39
Zn	135	88	73	97	67

Примечание. Слой водного стока ориентировочно принят постоянным в размере 136 мм.

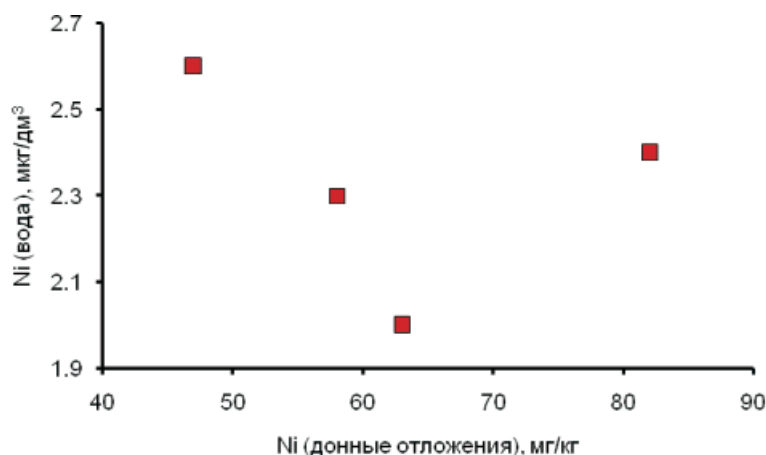


Рис. 2. Соответствие концентраций Ni в донных отложениях и водах малого водотока в междуречье рек Ангара и Подкаменная Тунгуска

Расчёт концентраций веществ в истоках реки проводился по данным, полученным для пунктов в створах участков с наименьшей площадью (203 и 304 км²). Их сопоставление с измеренными содержаниями свидетельствует о перспективности поисков чёрных и цветных металлов в данном регионе (таблица).

Зависимости концентраций ряда химических элементов от площади водосбора установлены не только для малых, но средних и даже больших рек. Например, для р. Васюган (левый приток р. Оби в Томской области) выявлено значимое уменьшение концентраций Mn в донных отложениях от

верховий к устью (рис. 3), а для р. Томи – снижение содержаний Ti, Fe, Al и увеличение Si [7, 8]. Однако в целом с увеличением площади водосбора и водного стока зависимости вида (9) становятся более неустойчивыми (по сравнению с малыми реками), что объясняется существенными изменениями водного стока и гидравлических условий (скорость течения, глубина и ширина потока, гидравлическая крупность наносов). В качестве подтверждения можно привести результаты моделирования пространственной динамики концентрации условного вещества при различных вариантах изменения слоя стока на водосборе (рис. 4).

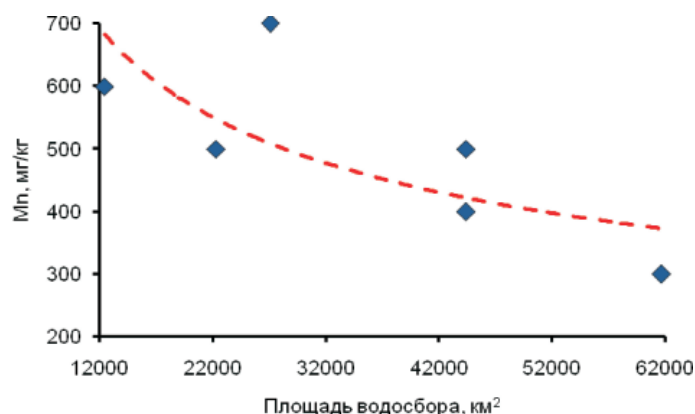


Рис. 3. Изменение концентраций Mn в донных отложениях р. Васюган (левый приток р. Оби) по мере возрастания площади водосбора; проба с максимальной концентрацией Mn 700 мг/кг отобрана у устья крупного левого притока – реки Махня

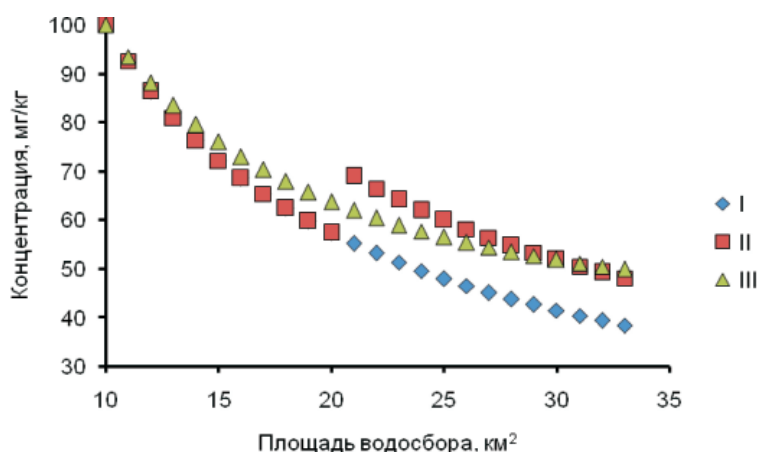


Рис. 4. Модельный расчёт изменения концентрации условного вещества в донных отложениях при $C_p = 100$ мг/кг, $F_0 = 10$ км², $\eta = -0,2$; условия изменения слоя стока: I – $Y = 100$ мм; II – при площади водосбора до 20 км² $Y = 100$ мм, при большей площади $Y = 80$ мм; III – при увеличении F на 1 км² слой стока Y уменьшается на 1 мм

При этом следует подчеркнуть, что подобные изменения характерны для всех водотоков – и малых, и средних, и больших. Однако с точки зрения геохимических поисков важно, чтобы они либо сводились к выходу малой реки на равнинный уча-

сток, либо возможности аккумуляции вещества на участке средней или большой реки на участке пониженной интенсивности водообмена в течение длительного времени (например, на участках русловой многоруканности). Еще одно важное

примечание касается целесообразности проведения пробоотбора в такой период гидрологического года, когда фактический водный сток примерно равен среднесреднегодному (обычно это – летне-осенняя межень – время, наиболее удобное для полевых работ).

При допущении условной стационарности условий формирования химического состава донных отложений и нивелирования в течение года флуктуаций, связанных с колебаниями водности реки и соответствующих концентраций вещества в водной среде и донных отложений согласно зависимости (11), это позволит повысить достоверность выборочных оценок средних концентраций веществ в донных отложениях.

$$C \equiv \bar{C} \cdot \left(\frac{Q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{k_c}{\lambda}}, \quad (11)$$

где \bar{Q} – расход воды, соответствующий условно равновесной концентрации \bar{C} в конкретном створе реки; λ – удельная скорость изменения расхода воды, c^{-1} (обоснование зависимости (11) приведено в [6]).

Таким образом, модель (9) является теоретической основой для планирования и проведения поисков полезных ископаемых, месторождения которых формируются в междуречьях рек в зоне гипергенеза при активном участии гидрологических процессов. При этом сущность методологии поисков подобных полезных ископаемых заключается в выявлении участков с одноразовым и устойчивым изменением интенсивности водообмена (а именно – её уменьшением), последующем опробовании речных отложений в подобных местах и оценке перспективных для более детальных исследований участков.

Заключение

Разработана модель изменения химического состава донных отложений по длине водотоков (9), на основе которой предлагается методология поисков полезных ископаемых, включающая в себя:

1) геоинформационный анализ исследуемой территории с целью выделения малоприточных участков с относительно резким уменьшением интенсивности водообмена (выходы рек с горных районов на равнинный, обширные участки с русловой многоруканностью);

2) отбор 2–3 проб донных отложений на выявленных участках и определение их химического состава;

3) расчёт содержаний веществ C_0 в истоках рек по формуле (11) и планирование

детального обследования районов с повышенными значениями C_0 с большей частотой опробования донных отложений рек и других компонентов окружающей среды;

4) проведение детального специализированного геолого-геохимического картирования перспективной площади.

Опробование речных отложений рекомендуется проводить в период с водным стоком, близким к среднесреднегодным значениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-05-98045 p_сибирь_a, РНФ 14-17-00045.

Список литературы

1. Веницианов Е.В. Физико-химические процессы в поверхностных водах // Водные проблемы на рубеже веков / отв. ред. М.Г. Хублярян. – М.: Наука, 1999. – С. 241–255.
2. Домаренко В.А. Радиогидрогеохимическое районирование юга Красноярского края и Республики Хакасия // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы III Международной конференции – Томск, ТПУ, 23–27 июня 2009. – Томск: STT, 2009. – С. 167–171.
3. Домаренко В.А. Рациональная методика поисков и геолого-экономической оценки месторождений руд редких и радиоактивных элементов. Ч. 1. Прогнозирование, поиски и оценка. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 167 с.
4. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. – М.: Наука, 2010. – 243 с.
5. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – 92 с.
6. Савичев О.Г. Метод оценки допустимых антропогенных изменений химического состава поверхностных вод // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 51–55.
7. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
8. Савичев О.Г., Лыготин В.А. Пространственные изменения химического состава донных отложений рек Томской области // География и природные ресурсы. – 2008. – № 3. – С. 46–51.
9. Савичев О.Г., Копылова Ю.Г., Хвашевская А.А. Эколого-геохимическое состояние окружающей среды в Северном Приангарье (Восточная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 129–136.
10. Состояние геологической среды (недр) Сибирского федерального округа в 2005 г.: Информационный бюллетень / под ред. В.А. Лыготина. – Вып. 2. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2006. – 166 с.
11. Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озёр Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск: Институт геологии и минералогии СО РАН, 2011. – 30 с.
12. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1: 200000. – М.: ИМГРЭ РАН, 2002. – 92 с.
13. Янин Е.П. Русловые отложения равнинных рек (геохимические особенности условий формирования и состава). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 139 с.
14. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.

References

1. Venecianov E.V. Piziko-khimicheskie protsessy v poverkhnostnykh vodakh // *Vodnye problemy na rubezhe vekov / otv. red. M.G. Khublaryan. M.: Nauka, 1999, pp. 241–255.*

2. Domarenko V.A. Radiogeokhimicheskoe rayonirovanie yuga Krasnoyarskogo kraya I Respubliki Khakasia // *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii. Tomsk, TPU, 23–27.06.2009. Tomsk: STT, 2009, pp. 167–171.*

3. Domarenko V.A. Ratsionalnaya metodika poiskov I geologo-ekonomicheskoy otsenki mestorozhdeniy rud redkikh I radioaktivnykh elementov. Ch. 1. Prognozirovanie, poiski I otsenka. Tomsk: Izd. TPU, 2012. 167 p.

4. Martynova M.V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushaya limnicheskikh ekosistem. M.: Nauka, 2010. 243 p.

5. Rukovodstvo po opredeleniyu gidrograficheskikh kharakteristik kartometricheskim sposobom. L.: Gydrometeoizdat, 1986. 92 p.

6. Savichev O.G. Metod otsenki dopustimyykh antropogennykh izmeneniy khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod // *Izvestia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 308. no. 4, pp. 51–55.*

7. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav I ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami // *Geoekologiya. 2003. no. 2, pp. 108–119.*

8. Savichev O.G., Lgotin V.A. Prostranstvennye izmeneniya khimicheskogo sostava donnykh otlozheniy rek Tomskoy oblasti // *Geografiya I prirodnye resursy. 2008. no. 3. pp. 46–51.*

9. Savichev O.G., Kopilova Yu.G., Khvashevskaya A.A. Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie okruzhayushey sredy v Severnom Priangarie (Vostochnaya Sibir) // *Izvestia Tom-*

skogo politekhnicheskogo universiteta. 2010. T. 316. no. 1, pp. 129–136.

10. Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) Sibirskogo federalnogo okruga v 2005 g.: *Informatsionny byulleten / pod red. V.A. Lgotina. Vyp. 2. Tomsk: OAO «Tomskgeomonitoring», 2006. 166 p.*

11. Strakhovenko V.D. Geokhimiya donnykh otlozheniy malykh kontinentalnykh ozer Sibiri: avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni dr. geol. nauk. Novosibirsk: Institut geologii I mineralogii SO RAN, 2011. 30 p.

12. Trebovaniya k proizvodstvu I rezul'tatam mnogotsel'evogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1: 200000. M.: IMGRE, 2002. 92 p.

13. Yanin E.P. Ruslovye otlozheniya ravninnykh rek. – M.: IMGRE, 2002. 139 s.

14. Yanin E.P. Tekhnogennye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek. M.: IMGRE, 2002. 52 p.

Рецензенты:

Шумилин М.В., д.г.-м.н., профессор, консультант, Федеральное государственное унитарное предприятие (ФГУП) «Урангео», г. Москва;

Поцелуев А.А., д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов, Томский политехнический университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 11.04.2014.