

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКОВ МАТЕРИАЛА В РУСЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ БУРЕЯ НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

О.А. Сорокина

*ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Релочный 1, г. Благовещенск, 675000;
e-mail: sorokina@ignm.ru*

Поступила в редакцию 18 февраля 2018 г.

В статье представлены результаты исследований макро- и микроэлементного состава русловых отложений р. Бурей. На основе анализа изменения характера распределения микроэлементов (редкоземельных элементов), а также значений геохимических индексов (WIP, STI, R, CIA, CIW, PIA, V) показано, что русловые отложения различных участков реки сформированы за счет разных источников. Так величины указанных индексов, а также проявляемые тенденции их изменения позволяют предполагать, что главным источником материала в русловых отложениях на верхнем (горном) участке реки Бурей являются гранитоиды, развитые в пределах ее долины. При этом вниз по течению реки на этом участке отмечается закономерное увеличение доли более выветрелого материала в области размыва. На нижнем участке реки Бурей (с выходом реки на предгорную равнину) величины индексов химического выветривания в русловых отложениях не наследуют тенденции, проявленные на верхнем ее участке, а сами русловые отложения нижнего участка реки Бурей по своему химическому составу сопоставимы с таковыми реки Амур. В этой связи мы полагаем, что русловые отложения нижнего участка реки Бурей сформированы преимущественно за счет материала, принесенного рекой Амур.

Ключевые слова: русловые отложения, редкоземельные элементы, индексы выветривания, р. Амур, р. Бурей, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Реки играют ключевую роль в процессах, происходящих на поверхности Земли. Они являются как основным фактором эрозии, так и главным переносчиком терригенного материала, а аккумуляция последнего вносит значительный вклад в формирование верхней континентальной коры. При этом химический состав русловых отложений является источником информации не только о составе доминирующих пород в области размыва, но и о степени и характере их выветривания.

В этом направлении в настоящее время разностороннее изучение процессов химического выветривания осуществляется на основе исследований русловых отложений как главных [10, 11, 20, 29], так и небольших [29, 31] рек. Накопленный достаточно внушительный объем аналитических данных по различным континентам представлен в серии обобщающих работ зарубежных авторов (см. обзоры в [13, 16, 19]). Кроме того, показано, что, наряду с рельефом и климатом [15], весьма значимую роль в процессах

выветривания и переноса материала реками играют также состав пород и тектонические условия в пределах водосбора [18, 20]. Важным аспектом изучения процессов выветривания является также анализ взаимосвязи процессов химического выветривания и физической денудации (эрозии) [16, 19].

Анализ опубликованных материалов свидетельствует о том, что к настоящему времени достаточно детально изучен состав и особенности химического выветривания русловых отложений крупных рек в тропических и субтропических областях Азии, в том числе: Хуанхэ и Янцзы, Жемчужной, Красной, Меконг [20], рек острова Тайвань [26], Малазийского полуострова и северного Борнео [31], Тибетского нагорья [10].

Исследования же процессов формирования русловых отложений рек Дальнего Востока ранее проводились не системно [1, 3–8]. Как правило, они имеют экологическую направленность и базируются на основе анализа ограниченного количества микроэлементов.

В данной работе представлены результаты исследования химического состава русловых отложений

реки Бурея в ее нижнем течении (рис. 1). Река Бурея является одним из крупных водотоков бассейна реки Амур. Целью исследования является выявление общих тенденций изменения геохимических особенностей русловых отложений как отражения процессов выветривания исходных пород в пределах изучаемого водосбора.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Река Бурея – левый приток Амура, образуется от слияния двух рек: истоков Правой Буреи илевой Буреи, они берут начало в отрогах хребтов Эзоп и Дуссе-Алинь. Длина от истока 623 км, площадь бассейна 70.7 тыс. км². Бассейн расположен в среднегорье – высоты Туранского и Буреинского хребтов достигают 1.5–2.0 км. В нижнем течении река протекает по Зейско-Буреинской равнине. Верхнее течение реки – это участок до места впадения притока Ниман, среднее течение – между устьями притоков Ниман и Туюн, нижнее течение – от места впадения притока Туюн до устья. В верховье рельеф пересеченный, высокие водоразделы представлены выровненными гольцовыми поверхностями, низкие водоразделы и склоны речных долин покрыты лесом, глубина вреза долины составляет 400–500 м. К устью притока Ниман глубина вреза долины уменьшается до 150–200 м. Русло Буреи разветленно-извилистое, много вынужденных излучин. Ширина русла достигает 180 м при ширине поймы 2.5–3.0 км. Валунно-галечный состав русловых отложений постепенно сменяется на галечно-песчаный. В среднем течении река имеет высокий правый берег, образует чередующиеся участки разветленно-извилистого русла, разбросанных разветвлений и относительно прямолинейного русла. Ширина русла увеличивается до 300 м, ширина поймы – 2.5–3.0 км. Русло сложено галькой. У с. Талакан (174 км от устья) находится плотина Бурейской ГЭС. После заполнения Бурейского водохранилища его форма повторяет извилистую конфигурацию врезанной долины шириной 400–500 м. Ниже пос. Новобурейский река выходит на предгорную равнину, русло становится широкопойменным; формируются извилистые, разветленно-извилистые и многоукавные участки реки. Русловые отложения – песчано-галечные.

Климат в исследуемом регионе имеет черты резко континентального и муссонного климата. Река Бурея относится к группе рек преимущественного дождевого питания. Среднегодовой расход воды 950 м³/с (объем стока 29.983 км³/год).

Опробование русловых отложений проводилось в нижнем течении реки Бурея вдоль берега через 10–15 км (рис. 1). В пределах опробованного участка русловые отложения представляют собой песчано-

галечные породы. Вес отобранной пробы составлял приблизительно 0.5 кг. Пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, затем из этого материала выделялась фракция частиц размером менее 1 мм, которая измельчалась с помощью механического истирателя.

Определение содержаний породообразующих оксидов, Zr, Nb в пробах выполнено рентген-флуоресцентным методом в Институте геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск, аналитики Зиневиц А.А., Ушакова Е.В.), содержания Rb, U, Th, Pb, Mo, Ba, Ta, Sr, Y, Zn, Sc, Co, Cu, редкоземельных элементов (РЗЭ) – методом ICP-MS в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН (г. Владивосток, аналитик Зарубина Н.В.).

Гомогенизация порошковых проб для рентген-флуоресцентного анализа выполнялась путем сплавления со смесью метабората и тетрабората лития в муфельной печи при 1050–1100°C. Измерения проводились на рентгеновском спектрометре Pioneer 4S (Брукер, Германия). Величины интенсивности аналитических линий корректировались на фон, эффекты поглощения и вторичной флуоресценции. Вскрытие образцов для определения содержаний редкоземельных элементов методом ICP-MS осуществлялось по методике кислотного разложения в смеси кислот HF, HNO₃, HClO₄ в отношении 2.5:1:0.5. Измерения проводились на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 с (Agilent Technologies, США). Относительное стандартное отклонение для всех элементов не превышало 5–10 %

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав русловых отложений является источником информации не только об особенностях состава пород в области размыва, но и о степени и характере выветривания. При этом для выявления особенностей химического состава в настоящее время в мировой практике используются графики нормированных концентраций элементов (спайдер-диаграммы) [32]. Для характеристики процессов выветривания в областях размыва все чаще используются индексы (WIP, CIA, CIW, PIA и др.), разработанные для исследования осадочных пород [2, 9, 32].

Исследуемую долину реки Бурея можно условно разделить на участки в соответствии с особенностями геоморфологии и водного режима. Участок «Бурея-1», расположенный ниже пос. Талакан до пос. Новобурейский, характеризующийся узкой врезанной долиной, горным рельефом местности, и участок «Бурея-2» – ниже пос. Новобурейский до устья реки – участок предгорной долины (рис.1). Результаты анализа концентраций основных петрогенных элементов

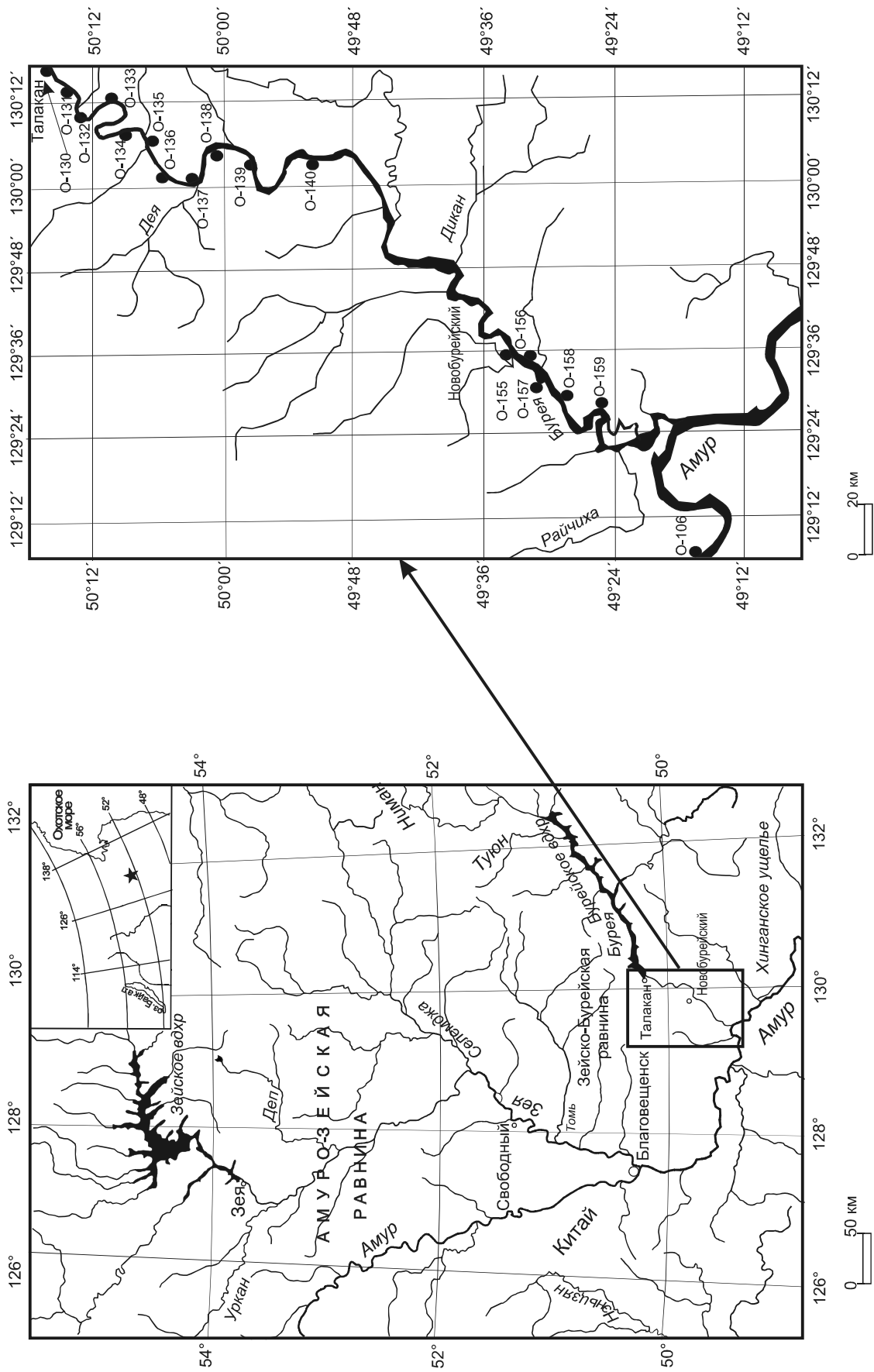


Рис. 1. Орографическая карта бассейна р. Бурей. Точками указаны места отбора проб.

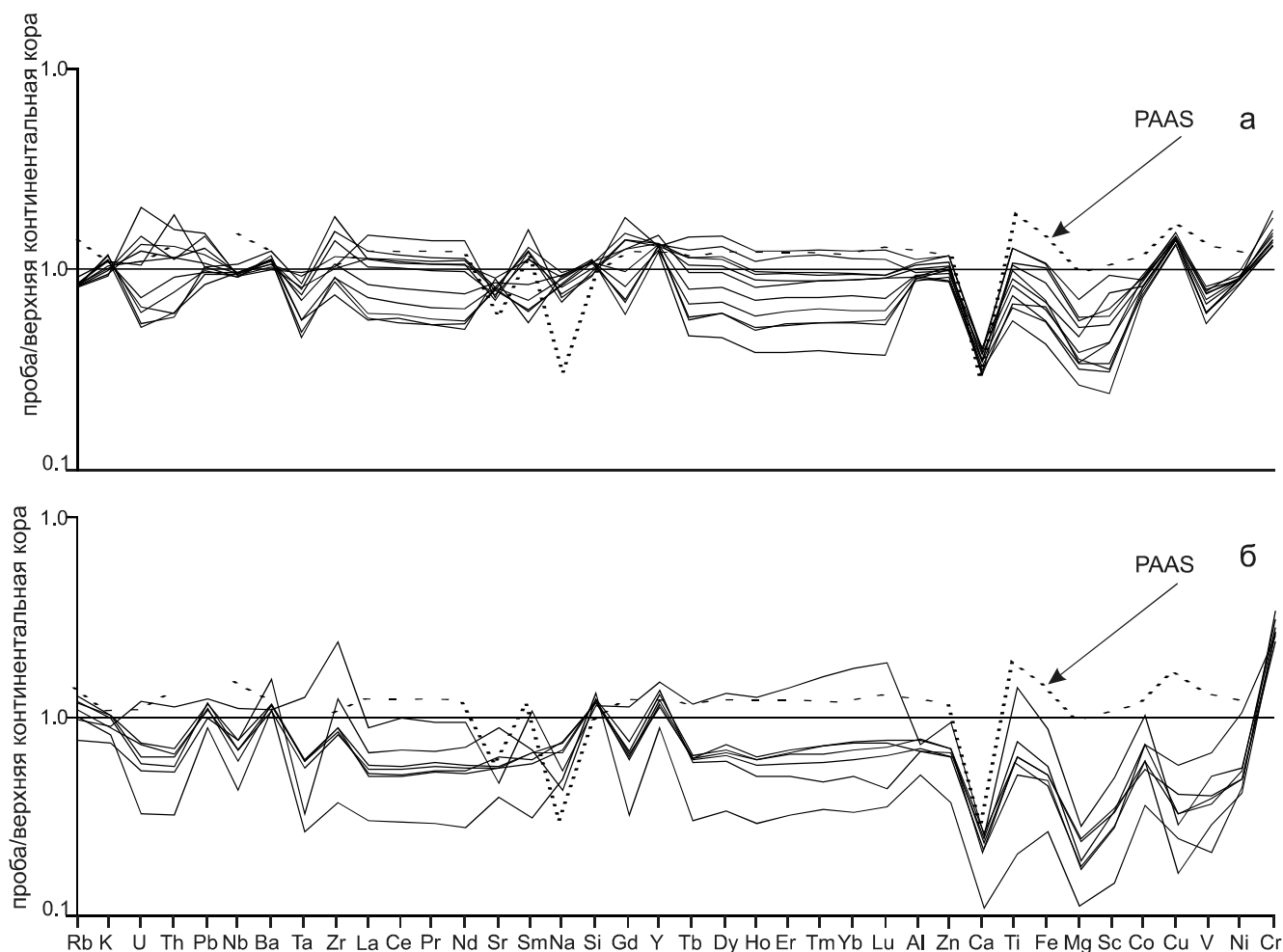


Рис. 2. Диаграмма нормированных концентраций основных и микроэлементов в русловых отложениях на участках «Бурей-1» (а), «Бурей-2» (б) в сравнении с PAAS [28].

Состав верхней континентальной коры по [28].

и микроэлементов в русловых отложениях исследованных участков приведены в таблице 1.

Геохимические особенности русловых отложений на различных участках р. Бурей существенно различны, и это выражается как в характере распределения микроэлементов, так и в соотношении макрокомпонентов.

Из анализа мультиэлементной диаграммы (рис. 2) следует, что составы русловых отложений р. Бурей, нормированные на состав верхней континентальной коры (UCC – Upper continental crust) [28], обеднены основными петрогенными элементами – Ca, Fe, Mg. Содержание Si, Ti близки к таковым в верхней континентальной коре. Концентрации Na, K, Al демонстрируют разную степень соответствия UCC: на участке «Бурей-1» их содержания приближены к UCC, а на участке «Бурей-2» – в значительной степени истощены. В целом уровень концентраций элементов русло-

вых отложений исследованного участка реки близок к составу постархейского австралийского сланца (PAAS – Post-Archean Australian Shale) [28] (рис. 2).

Содержания редких элементов также характеризуются относительным дефицитом практически всех проанализированных элементов (рис. 2), за исключением Ba, Pb, Zr, Y, Cr, содержания которых приближены к таковым в верхней континентальной коре. Концентрации практически всех элементов не проявляют каких-либо отчетливых тенденций, однако следует отметить более высокие содержания этих элементов на участке «Бурей-1» по сравнению с участком «Бурей-2».

Обратившись к редкоземельным элементам, отметим, что на разных участках р. Бурей индикаторные отношения $((La/Yb)_N, Eu/Eu^*, (Gd/Yb)_N)$, иллюстрирующие характер распределения редкоземельных элементов в русловых отложениях, проявляют раз-

Таблица 1. Химический состав представительных образцов русловых отложений р. Буряя (фракция менее 1 мм), г/т.

Образец	Буряя-1							
	о-130-ро	о-131-ро	о-132-ро	о-133-ро	о-134-ро	о-135-ро	о-136-ро	о-137-ро
SiO ₂	70.10	73.53	71.39	71.65	60.73	72.28	73.43	61.92
TiO ₂	0.45	0.28	0.41	0.49	0.64	0.37	0.32	0.64
Al ₂ O ₃	14.68	13.68	14.15	13.83	16.98	14.05	13.32	16.30
Fe ₂ O ₃	3.07	1.91	2.83	3.16	4.82	2.49	2.46	4.78
MnO	0.06	0.04	0.06	0.06	0.08	0.05	0.07	0.21
MgO	1.02	0.58	0.85	0.76	1.56	0.74	0.70	1.27
CaO	1.71	1.32	1.58	1.48	1.68	1.45	1.39	1.61
Na ₂ O	3.76	3.58	3.63	3.55	2.81	3.50	3.31	2.93
K ₂ O	3.54	4.01	3.72	3.72	3.12	3.98	3.78	3.21
P ₂ O ₅	0.15	0.09	0.13	0.12	0.21	0.11	0.09	0.23
Rb	93.44	92.07	94.91	102.89	90.79	91.14	95.42	92.06
U	3.06	1.50	2.03	2.93	5.70	1.70	1.44	3.71
Th	12.25	6.22	9.81	20.00	16.84	8.24	6.53	13.86
Pb	21.70	17.58	16.43	17.55	25.76	16.83	14.29	20.18
Nb	11	11	12	13	11	11	12	12
Ba	582	645	620	675	548	616	611	602
Ta	0.93	0.56	0.70	0.85	0.96	0.56	0.49	0.80
Zr	220	142	202	348	195	173	165	293
Sr	277	315	301	318	253	286	283	284
Y	29	27	29	32	29	28	29	30
Zn	70	62	68	73	83	62	65	83
Sc	10.34	3.28	5.90	5.85	12.71	4.64	4.21	7.93
Co	13.9	12.3	13.8	15.4	15.1	12.7	13.2	15.9
Cu	35.0	33.1	35.1	38.3	35.4	33.1	35.1	36.5
V	75.6	57.3	72.1	83.2	85.5	65.2	64.6	87.6
Ni	39.6	37.0	39.1	42.9	38.9	37.47	39.6	40.6
Cr	118.5	111.5	119.2	152.8	110.1	110.4	165.6	124.0
La	33.9	16.9	25.2	33.6	44.6	21.8	17.1	36.9
Ce	72.0	36.5	51.6	68.9	91.5	43.4	34.9	76.0
Pr	7.77	3.76	5.51	7.51	9.85	4.59	3.79	8.10
Nd	28.8	13.1	19.7	27.2	36.0	16.6	13.9	29.4
Sm	5.81	2.43	3.79	5.04	7.07	3.15	2.77	5.57
Eu	1.19	0.76	0.84	0.88	1.25	0.78	0.67	1.06
Gd	5.72	2.28	3.70	4.78	6.86	3.11	2.60	5.33
Tb	0.80	0.30	0.51	0.62	0.93	0.43	0.36	0.73
Dy	4.55	1.61	2.86	3.38	5.14	2.41	2.12	3.94
Ho	0.88	0.31	0.56	0.65	0.99	0.47	0.40	0.76
Er	2.66	0.89	1.67	1.93	2.83	1.42	1.23	2.20
Tm	0.39	0.13	0.24	0.29	0.41	0.21	0.18	0.31
Yb	2.49	0.84	1.62	1.94	2.71	1.37	1.21	2.09
Lu	0.36	0.12	0.23	0.29	0.40	0.20	0.18	0.30
WIP	72	72	71	70	60	71	68	61
CIW	61	62	62	62	69	63	63	68
CIA	53	52	52	52	61	53	53	59
PIA	54	53	53	53	64	54	54	62
V	1.6	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8
STI	86	88	87	86	82	87	88	83
R	7.1	9.1	8.6	8.8	6.1	8.7	9.4	6.4

Примечание. Концентрация основных элементов (от SiO₂ до P₂O₅) выражена в %. Пояснения индексов в тексте.

личные тенденции. В частности, на участке «Буряя-1» величины этих отношений закономерно снижаются, что отражает выполаживание графиков редких земель, уменьшение европейской аномалии (рис. 3 а, б, в). На участке «Буряя-2» величины этих индикатор-

ных отношений скачкообразно изменяются. Суммарные концентрации REE в русловых отложениях исследованных участков варьируют от 42 г/т до 210 г/т, при этом наибольшие суммарные концентрации REE свойственны русловым отложениям участка «Бу-

Таблица 1. (продолжение).

Образец	Буряя-1			Буряя2					
	о-138-ро	о-139-ро	о-140-ро	о-155-ро	о-156-ро	о-157-ро	о-158-ро	о-159-ро	о-106-ро
SiO ₂	6.52	64.49	70.94	78.62	76.09	72.88	78.31	75.80	78.94
TiO ₂	0.52	0.54	0.34	0.25	0.31	0.68	0.29	0.31	0.37
Al ₂ O ₃	15.32	15.98	13.61	9.91	11.26	10.86	10.30	11.46	10.01
Fe ₂ O ₃	3.86	4.58	2.92	2.12	2.24	3.82	1.98	2.24	2.48
MnO	0.12	0.12	0.16	0.08	0.10	0.41	0.05	0.07	0.06
MgO	1.14	1.22	0.79	0.37	0.51	0.61	0.38	0.53	0.41
CaO	1.47	1.27	1.23	0.88	1.07	1.03	0.89	0.96	1.00
Na ₂ O	3.17	2.66	3.23	2.52	2.87	2.05	2.60	2.83	1.63
K ₂ O	3.41	3.36	3.77	2.90	3.36	2.98	3.25	3.35	2.43
P ₂ O ₅	0.15	0.20	0.12	0.07	0.07	0.14	0.07	0.07	0.10
Rb	93.86	92.25	95.63	119.00	128.10	107.30	131.04	139.08	83.06
U	3.45	4.11	1.83	1.99	1.72	3.28	1.58	2.01	1.46
Th	12.26	11.98	6.43	6.78	6.54	11.67	5.86	7.24	5.51
Pb	18.20	24.86	16.00	18.12	18.20	20.66	19.57	19.27	16.49
Nb	11	11	11	8	7	13	8	9	9
Ba	582	565	615	570	620	583	613	618	826
Ta	0.75	0.81	0.46	0.54	0.59	1.22	0.59	0.60	0.32
Zr	265	192	173	150	155	442	164	165	229
Sr	262	245	275	189	215	158	189	192	302
Y	30	29	29	24	26	32	25	28	29
Zn	74	77	71	44	48	65	44	48	46
Sc	7.24	8.68	4.33	3.72	4.43	6.62	3.76	4.61	4.52
Co	14.7	15.4	13.9	12.0	10.1	17.3	10.2	9.3	12.1
Cu	36.1	35.6	34.9	8.0	8.2	7.4	4.2	10.1	14.3
V	80.5	81.3	65.6	38.1	41.3	53.2	30.0	42.4	69.2
Ni	39.7	39.1	39.1	23.1	21.3	24.2	18.1	21.4	45.4
Cr	127.8	115.9	133.6	256.1	196.4	231.3	222.0	216.4	210.3
La	31.0	34.0	18.0	16.1	15.4	25.9	14.8	16.7	19.3
Ce	65.0	70.4	38.4	34.0	32.2	61.8	31.6	35.3	42.5
Pr	6.98	7.56	4.08	3.92	3.75	6.55	3.67	4.07	4.64
Nd	25.3	27.6	14.4	14.1	13.6	24.1	13.2	14.6	17.8
Sm	5.11	5.50	2.85	2.89	2.69	4.70	2.55	2.91	2.99
Eu	0.89	1.02	0.67	0.52	0.54	0.68	0.52	0.56	0.76
Gd	4.80	5.31	2.70	2.42	2.34	4.19	2.28	2.49	2.80
Tb	0.67	0.73	0.37	0.39	0.39	0.72	0.38	0.40	0.37
Dy	3.65	4.06	2.12	2.48	2.26	4.48	2.20	2.34	2.07
Ho	0.71	0.78	0.41	0.49	0.48	0.98	0.45	0.48	0.40
Er	2.01	2.23	1.21	1.54	1.49	3.15	1.30	1.47	1.13
Tm	0.29	0.32	0.18	0.23	0.23	0.51	0.19	0.21	0.15
Yb	1.94	2.11	1.19	1.58	1.61	3.78	1.32	1.47	1.08
Lu	0.29	0.30	0.17	0.23	0.24	0.58	0.20	0.22	0.14
WIP	65	59	67	51	59	48	55	58	50
CIW	66	71	64	63	63	67	64	64	66
CIA	57	61	54	53	52	56	52	53	56
PIA	60	65	56	54	53	59	54	55	62
V	1.8	2.0	1.8	2.0	1.9	2.1	2.0	1.9	2.5
STI	85	84	87	90	89	87	90	89	93
R	7.5	6.9	8.8	13.05	11.5	11.4	12.9	11.2	10.1

рея-1» (табл. 1, рис. 3 г). Данное обстоятельство, на наш взгляд, указывает на то, что русловые отложения участков «Буряя-1» и «Буряя-2» сформированы за счет разных источников.

Данные о химическом составе осадочных пород, содержании и соотношениях в них элементов исполь-

зуются для расшифровки их генезиса. Применительно к речным отложениям очевидно, что выветривание пород на водосборах существенно меняет состав слагающих эти породы компонентов: происходит вынос из первичных пород наиболее мобильных элементов (K, Na, Ca, Mg).

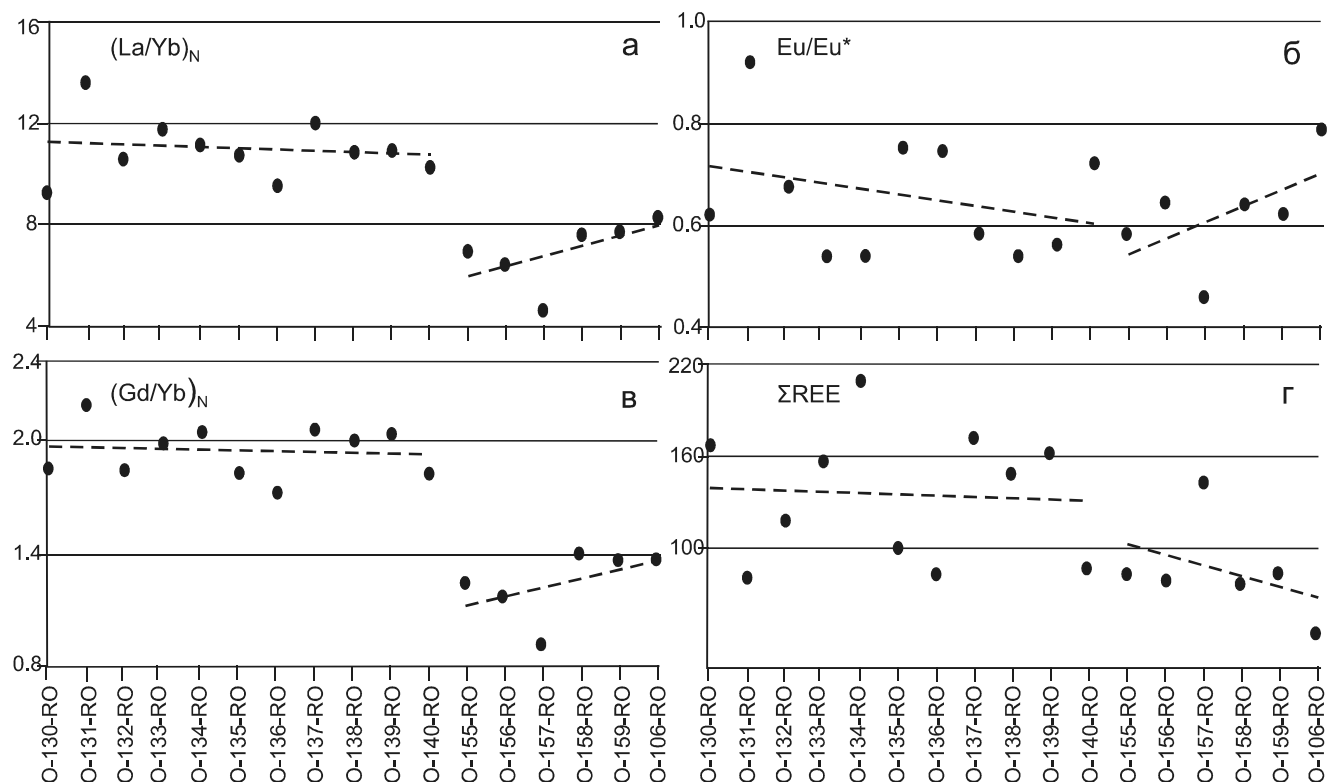


Рис. 3. Графики изменения величин $(La/Yb)_N$, Eu/Eu^* , $(Gd/Yb)_N$, ΣREE в русловых отложениях на участках «Буряя-1», «Буряя-2».

Интенсивность процессов преобразования исходных пород в областях размыва могут быть оценены количественно по величине специфических геохимических индексов. Величины этих индексов, отражающих степень выветривания пород в источнике сноса (см. ниже), в речных отложениях реки Буряя варьируют в достаточно широком диапазоне, но при этом проявляют отчетливые тренды в пределах исследованных участков («Буряя-1» и «Буряя-2»).

WIP (*Weathering Index of Parker*) – индекс выветривания Паркера [23] – используется для оценки интенсивности выветривания силикатных пород, основанной на соотношении щелочных и щелочно-земельных элементов в продуктах выветривания. WIP определяется как $100 \times (2Na_2O / 0.35 + MgO / 0.9 + 2K_2O / 0.25 + CaO / 0.7)$. Исходя из формулы понятно, что меньшие значения WIP указывают на сильное химическое выветривание и идеальный тренд индекса – нисходящий. Значение индекса для верхней континентальной коры – 82, для ПААС – 52. А. Паркер применил этот индекс к кислым и средним изверженным породам. Но так как при расчете WIP используются только мобильные щелочные и щелочно-земельные элементы, его применение к сильно выветрелым материалам не всегда является надежным.

Характер распределения значений этих индексов сверху вниз по течению реки на участках «Буряя-1» и «Буряя-2» существенно различается. На участке «Буряя-1» значения индекса WIP в русловых отложениях закономерно снижаются от 72 до 60 (рис. 4 а), при этом его значения в точках в верхней части этого участка лежат в поле составов гранитов р. Буряя. Значения WIP в русловых отложениях на участке «Буряя-2» существенно ниже – 48–59, они не обнаруживают каких-либо отчетливых трендов вниз по течению реки и соответствуют значениям WIP в русловых отложениях р. Амур.

Химический индекс преобразования (Chemical Index of Alteration) CIA = $100 \times (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O))$ [22], химический индекс выветривания (Chemical Index of Weathering) CIW = $100 \times (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O))$ [17] и индекс преобразования плагиоклаза (Plagioclase Index of Alteration) PIA = $100 \times ((Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O))$ [14] по своей сути близки между собой. Они основаны на соотношении групп подвижных и неподвижных элементов (эти показатели предполагают, что Al неподвижен) и рассматриваются как оценка степени преобразования полевых шпатов в глины [14, 22]. С развитием химического выветривания щелочные и

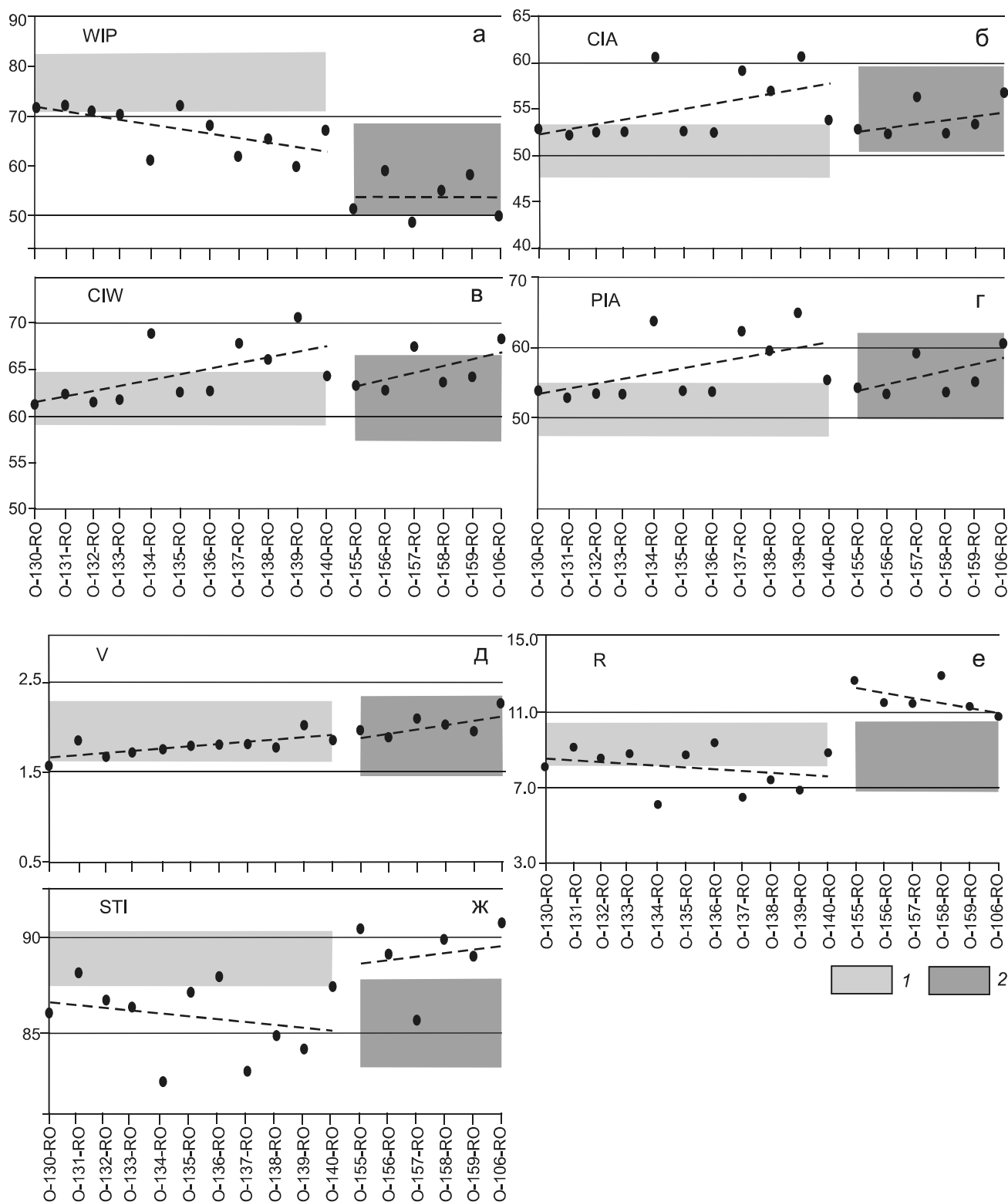


Рис. 4. Графики изменения величин WIP [23], CIW [17], CIA [22], PIA [14], V [29], STI [12], R [25] в русловых отложениях на участках «Буря-1», «Буря-2» сверху вниз по течению реки.

1 – поле гранитов, расположенных в бассейне р. Буря (составы заимствованы в [27], 2 – русловые отложения р.Амур. Пунктиром показана линия тренда. Пояснения и значимость различий индексов в тексте и в табл. 2.

щелочноземельные элементы выносятся и значения CIA, CIW, PIA, соответственно, увеличиваются от 50 у невыветренных пород до величин, близких к 100, у каолинита. Индекс CIA впервые использован в 1982 г. для реконструкции палеоклимата протерозойских отложений близ оз. Гурон и в настоящее время широко используется для количественной оценки интенсивности химического выветривания в водосборных бассейнах [19, 21, 27]. Ли и Янг [19] систематизировали расчеты значений CIA сорока четырех рек по всему миру и предположили, что, в глобальном масштабе, этот индекс чувствителен к температуре поверхности Земли, зависит от широты устья реки и мощности почвенного покрова в водосборных бассейнах и, на самом деле, отражает интегрированное влияние климата и географической широты.

Величины этих индексов (CIA, CIW, PIA) в русловых отложениях на участке «Бурея-1» закономерно увеличиваются от 52 до 71. При этом точки в верхней части этого участка располагаются в поле гранитов р. Бурея (рис. 4 б–г). Несмотря на то, что значения этих индексов в русловых отложениях на участке «Бурея-1» и «Бурея-2» тождественны, на границе участков происходит скачкообразное снижение значений этих индексов, и составы русловых отложений участка «Бурея-2» отвечают составу русловых отложений р. Амур (рис. 4 б–г).

В 1927 г. Фогтом [30] был предложен остаточный индекс (*Vogt's Residual Index*) $V = (Al_2O_3 + K_2O) / (MgO + CaO + Na_2O)$, который был использован позднее для сравнения степени зрелости моренных и морских глин Норвегии [24]. На участке «Бурея-1» величина индекса V в русловых отложениях закономерно увеличивается от 1.6 до 1.8, оставаясь в поле значений этого индекса для гранитов р. Бурея (рис. 4 д). На участке «Бурея-2» величины индекса V в русловых отложениях более высокие, от 1.9 до 2.5 (рис. 4 д).

Коэффициент Рукстона (*Ruxton Ratio*) $R = SiO_2 / Al_2O_3$ [25] характеризует потери диоксида кремния по отношению к оксиду алюминия, предполагая, что последний является неподвижным в процессе выветривания. На участке «Бурея-1» величина индекса R в русловых отложениях изменяется от 6.1 до 9.3, при этом значения для точек опробования, расположенных в верхней части участка, соответствуют значениям для гранитов р. Бурея. На участке «Бурея-2» происходит резкое изменение значений этого индекса от 10.7 до 13.5 (рис. 4 е).

Кремниво-титановый индекс (*Silica-Titania Index*) [12], $STI = (100)[(SiO_2/TiO_2) / ((SiO_2/TiO_2) + (SiO_2/Al_2O_3) + (Al_2O_3/SiO_2))]$. В отличие от всех выше рассмотренных индексов при его расчете используется

не только кремнезем и алюминий, но и титан. Это делает указанный индекс чувствительным к содержанию тяжелых минералов в русловых отложениях. Как следует из рисунка 4 ж, величина этого индекса в русловых отложениях р. Бурея весьма вариативна. Тем не менее, можно отметить, что на участке «Бурея-1» значение этого индекса определенно снижается от 88 до 85. На участке «Бурея-2» значение этого индекса существенно выше.

Таким образом, рассмотрев изменения величин индексов выветривания на участках р. Бурея, отметим, что они существенно различны. Значения индексов WIP, STI, R на участке «Бурея-1» характеризуются нисходящим трендом вниз по течению реки. В этом же направлении на данном участке индексам CIA, CIW, PIA, V свойственен восходящий тренд (рис. 4). Эти тенденции характеризуют увеличение доли продуктов выветривания кислых и средних магматических пород в русловых отложениях участка реки «Бурея-1». При этом величины всех без исключения индексов в русловых отложениях верхней части участка «Бурея-1» соответствуют таковым в гранитоидах, развитых в средней и верхней части р. Бурея. Это является очевидным следствием того, что русловые отложения на участке «Бурея-1» сформировались за счет размыва указанных пород.

С выходом долины р. Бурея в широкую пойму (граница участков «Бурея-1» и «Бурея-2») в русловых отложениях происходит резкое изменение значений большинства индексов, которые на участке «Бурея-2» не наследуют тенденции, проявленные на участке «Бурея-1» (рис. 4). Единственным объяснением этому может служить то обстоятельство, что в русловых отложениях реки «Бурея-2» появилось значительное количество материала, сформированного за счет размыва других источников. В этой связи представляется важным отметить, что в большинстве случаев величины индексов выветривания в русловых отложениях на участке «Бурея-2» отвечают таковым в русловых отложениях р. Амур (рис. 4).

Для установления формальной значимости различий между значениями использованных индексов выветривания на участках Бурея 1 и Бурея 2 нами был проведен статистический анализ с использованием программы R (<https://r-project.org>). В частности, было выполнено попарное сравнение этих индексов выветривания на наличие значимых различий в выборках «Бурея 1» и «Бурея 2».

На основании первичных расчетов было установлено, что значения индексов WIP, CIW и STI в исследуемых выборках относятся к параметрическим, а CIA, PIA и V – к непараметрическим данным. Зна-

чения индекса V мы смогли нормализовать, используя медианные значения вместо аномальных. Для вычисления уровня значимости для параметрических выборок использовался t-критерий Стьюдента и тест Тьюки, а для непараметрических – альтернативный тест T-критерий Краскела-Уоллиса.

Результаты статистической обработки приведены в таблице 2. Эти результаты свидетельствуют о том, что уровень значимости различий между выборками данных «Бурея 1» и «Бурея 2» для индексов выветривания WIP, V и STI весьма существенен ($p < 0.05$). Различия в величинах индексов выветривания CIA, SIW, PIA следует считать не значимыми. В то же время, следует отметить, что данный статистический критерий (p-value) позволяет оценить значимость различий величин индексов выветривания в выборках данных «Бурея 1» и «Бурея 2», но не тенденций их изменения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) Геохимические особенности русловых отложений на различных участках р. Бурея существенно различны, и это выражается как в характере распределения микроэлементов (редкоземельных элементов), так и соотношении макрокомпонентов. Это указывает на то, что русловые отложения участков «Бурея-1» и «Бурея-2» сформированы за счет разных источников.

2) На участке «Бурея-1» значения геохимических индексов и проявляемые тенденции их изменения позволяют предполагать, что главным источником материала в русловых отложениях на этом участке являются гранитоиды, развитые в средней и верхней части р. Бурея. При этом вниз по течению реки на этом

участке отмечается увеличение доли более выветрелого материала в области размыва.

3) Значения индексов химического выветривания на участке «Бурея-2» резко изменяются, что позволяет предположить, что русловые отложения участка сформированы за счет размыва других источников. Учитывая, что в большинстве случаев величины индексов выветривания в русловых отложениях на участке «Бурея-2» отвечают таковым в русловых отложениях р. Амур, то можно предположить, что они сформированы преимущественно за счет материала, принесенного р. Амур.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00151).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Игнатова В.Ф., Чудаев О.В. Твердый сток рек и осадки шельфа Японского моря (опыт сравнительного изучения). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 154 с.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Подковыров В.Н. др. Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в современных донных осадках нижнего течения р. Северной Двины и Белого моря // Литология и полез. ископаемые. 2014. № 6. С. 463–492.
- Махинова А.Ф., Махинов А.Н., Купцова В.А. и др. Ландшафтно-геохимическое районирование бассейна р. Амур (Российская часть) // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 2. С. 76–89.
- Сиротский С.Е., Харитонова Г.В., Ким В.И. и др. Гранулометрический и микроэлементный состав донных отложений реки Амур в среднем и нижнем течении // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 3. С. 88–98.
- Сорокина О.А., Зарубина Н.В. Химический состав донных отложений среднего течения реки Амур // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 5. С. 105–113.
- Сорокина О.А., Гусев М.Н., Зарубина Н.В. Особенности распределения химических элементов в русловых отложениях реки Зеи // География и природ. ресурсы. 2014. № 4. С. 91–98.
- Харитонова Г.В., Осторохова Е.В., Уткина Е.В., Коновалова Н.С., Стенина А.С. Микроэлементный состав донных отложений реки Бурея района Нижне-Бурейской ГЭС // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 5. С. 96–107.
- Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности состава воды и взвесей рек Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 102–119.
- Babechuk M. G., Widdowson M., Kamber B. S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India // Chem. Geol. 2014. V. 363. P. 56–75.
- Borges J.B., Huh Y., Moon S., Noh H. Provenance and weathering control on river bed sediments of eastern Tibetan Plateau and Russian Far East // Chem. Geol. 2008. V. 254. P. 52–72.
- Chetelat B., Liu C.-Q., Wang Q., Zhang G. Assessing the influence of lithology on weathering indices of Changjing river sediments // Chem. Geol. 2013. V. 359. P. 108–115.

Таблица 2. Величины значимости различий (p-value) между выборками данных «Бурея 1» и «Бурея 2».

Индекс выветривания	Значение уровень значимости (p-value)	Характеристика результата
WIP	$1.446 \times 10^{-3} / 7.57 \times 10^{-5} *$	Значима
CIA	0.4817**	Не значима
CIW	0.9437/0.9522088*	Не значима
PIA	0.6877**	Не значима
V	0.002569**	Значима
V (после нормализации данных)	$7.312 \times 10^{-5} / 7,11 \times 10^{-5} *$	Значима
STI	0.01257 / 0.0035327*	Значима

Примечание. * – вычисление уровня значимости проводилось по t-критерию Стьюдента / тесту Тьюки; ** – вычисления уровня значимости проводился по T-критерию Краскела-Уоллиса.

12. de Jayawurdena U.S., Izawa E. A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka // *Engineering Geol.* 1994. V. 36. P. 303–310.
13. Dupre B., Dessert C., Oliva P., Godderis Y., Viers J., Francois L., Millot R., Gaillardet J. Rivers, chemical weathering and Earth's climate // *C. R. Geosci.* 2003. V. 335. P. 1141–1160.
14. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geol.* 1995. V. 23. P. 921–924.
15. Gaezanti E., Resentini A. Provenance control on chemical of weathering // *Sedimentary Geol.* 2016. V. 336. P. 81–95.
16. Gaillardet J., Dupré B., Allègre C.J. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? // *Geochim. Cosmochim. Acta* 1999. V. 63(23/24). P. 4037–4051.
17. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // *Sedimentary Geol.* 1988. V. 55. N 3–4. P. 319–322.
18. Hren M. T., Chamberlain C. P., Hilley G. E., Blisniuk P.M., Bookhagen B. Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra river: chemical weathering, erosion, and CO₂ consumption in the southern Tibetan plateau and eastern syntaxis of the Himalaya // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2007. V. 71. P. 2907–2935.
19. Li C., Yang S. Is chemical index alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? // *Amer. J. Sci.* 2010. V. 310. P. 111–127.
20. Liu Z., Colin C., Le K.P., Tong S., Chen Z. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigation from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins // *Geochem., Geophys., Geosystems.* 2007. V. 8, N 5. P. 2195–2205.
21. McLennan S.M. Weathering and global denudation // *J. Geol.* 1993. V. 101. P. 295–303.
22. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* 1982. V. 299. P. 715–717.
23. Parker A. An index of weathering for silicate rocks // *Geol. Magaz.* 1970. V. 107. P. 501–504.
24. Roaldset E. Mineralogy geochemistry of Quaternary clays in the Numedal Area, southern Norway. *Norsk Grolisk Tidsskrift.* 1972. V. 52. P. 335–369.
25. Ruxton B.P. Measures of the degree of chemical weathering of rock // *J. Geol.* 1968. V. 76. P. 518–527.
26. Selvaraj K., Chen T.A. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks // *J. Geol.* 2006. V. 114. P. 101–116.
27. Sorokin A.A., Kotov A.B., Kudryashov N.M. Kovach V.P. Early Mesozoic granitoid and rhyolite magmatism of the Bureya Terrane of the Central Asian Orogenic Belt: Age and geodynamic setting // *Lithos.* 2016. V. 261. P. 181–194.
28. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Sci. Publ. 1985. 312 p.
29. Viers J., Dupré B., Braun J.-J., Deberdt S., Angeletti B., Ngoupayou J. N., Michard A. Major and trace elements abundances, and strontium isotopes in the Nyong basin rivers (Cameroon): constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments // *Chem. Geol.* 2000. V. 169. P. 211–241.
30. Vogt T. Sulitjemafeltets geologi og petrografi // *Norges Geologiske Undersokelse.* 1927. V. 121. P. 1–560.
31. Wang H., Liu Z., Sathiamurthy E., Colin C., Li J.R., Zhao Y.L. Chemical weathering in Malay Peninsula and North Borneo: Clay mineralogy and element geochemistry of river surface sediments // *Sci. China Earth Sci.* 2011. V. 54, N 2. P. 272–282.
32. Yang S. M., Pitawala A., Ishiga H. Geochemical characteristics of stream sediments, sediment fractions, soil, and basement rocks from the Mahaweli River and its catchment, Sri Lanka // *Chemie der Erde.* 2013. V. 73, N 3. P. 357–371.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

После доработки 23.08.2018 г.
принята к публикации 24.11.2018 г.

О.А. Sorokina

Reconstruction of sources of material in the stream sediments of the Bureya River lower reaches based on geochemical indices

The results of the studies of macro- and microelement composition of the Bureya River stream sediments are presented. Based on the analysis of changes in the nature of the distribution of trace elements (rare earth elements), as well as the values of geochemical indices (WIP, STI, R, CIA, CIW, PIA, V), it is shown that the stream deposits of different parts of the river are formed from different sources. The values of these indices and the trends of their changes suggest that the main source of material in the stream sediments in the upper (mountainous) part of the Bureya River are granitoids developed within its valley. At the same time, a natural increase in the proportion of more weathered material in the erosion area is observed downstream of the river in this area. In the lower part of the Bureya River (with the river reaching the foothill plain), the values of the chemical indices of weathering in the stream sediments do not inherit the trends manifested in its upper part. They exhibit the similar chemical composition as compared to those of the Amur River. In this regard, we believe that the channel deposits of the lower part of the Bureya River are formed mainly due to the material supplied by the Amur River.

Key words: stream sediments, rare earth elements, indices of weathering, Amur River, Bureya River, Far East of Russia.