

К ОЦЕНКЕ РЕДОКС-ОБСТАНОВОК РИФЕЙСКИХ И ВЕНДСКИХ БАССЕЙНОВ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ЗАПАДНОГО СКЛОНА УРАЛА

А.В. Маслов*, М.Т. Крупенин*, Э.З. Гареев, Г.А. Петров***

**Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН*

620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7

E-mails: maslov@igg.uran.ru, krupenin@igg.uran.ru, gpetrov@ugse.parad.ru

***Уфимский научный центр РАН*

450000, Уфа, ул. Карла Маркса, 6

E-mail: etik@anrb.ru

Поступила в редакцию 26 ноября 2002 г.

Цель настоящей работы – анализ окислительно-восстановительных обстановок в седиментационных бассейнах, существовавших в раннем, среднем и позднем рифее, а также в раннем и позднем венде в области сочленения Восточно-Европейской платформы и современного западного склона Урала. Для оценки редокс-обстановок использованы данные по содержаниям V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Th и U в средних пробах, составленных из 3–7 конкретных проб. Последние были отобраны из большинства литостратиграфических единиц типа рифея, серебрянской и сylvitsкой серий венда и проанализированы методом ISP-MS. Сделан вывод о том, что в рифейских бассейнах осадконакопления западного склона Южного Урала аноксических обстановок не существовало. Для вендских седиментационных бассейнов западного склона Среднего Урала только использование таких геохимических индексов как Mo/Mn, V/(V+Ni), общее содержание Mn и Ni/Co, позволяет более или менее определенно рассматривать время накопления мощных, исходно глинистых, толщ бутонской свиты как эпоху существования бассейна с резко ограниченной циркуляцией придонных вод и высоким редокс-потенциалом. Исходя из приведенных данных, можно предполагать, что наиболее согласующимися индексами редокс-обстановок являются отношения Mo/Mn, V/(V+Ni), Ni/Co, Mn и V/Cr. Однако взятый сам по себе ни один из указанных индексов, за исключением Mo/Mn, не является достоверным показателем окислительно-восстановительных обстановок в придонном слое бассейнов седиментации.

Ключевые слова: *рифей, венд, Южный Урал, Средний Урал, обстановки осадконакопления, редокс-обстановки.*

ON EVALUATION OF REDOX CONDITIONS IN RIPHEAN AND VENDIAN SEDIMENTARY BASINS ON THE WESTERN SLOPE OF THE URALS

A.V. Maslov*, M.T. Krupenin*, E.Z. Gareev, G.A. Petrov***

**Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS*

***Ufimian Science Centre of RAS*

The present work is aimed at analyzing redox conditions in the Early, Middle and Late Riphean, and also in the Early and Late Vendian sedimentary basins formed in the junction zone between the East European Platform and the western slope of the Ural Mountains. To evaluate the redox conditions we took the data on average V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Th and U content of 3 to 7 samples selected from the majority of lithostratigraphic units of the Riphean Burzyan, Yurmatau and Karatau Groups and the Vendian Serebryanka and Sylvitsa Groups and analyzed using the ISP-MS method. It was concluded that no anoxic environments occurred in Riphean sedimentary basins of the western slope of the South Urals. Regarding Vendian sedimentary basins of the western slope of the Central Urals only the use of such geochemical indices as Mo/Mn, V/(V+Ni), total Mn content and Ni/Co makes it possible to determine more or less definitely that accumulation of Buton argillites falls on the existence period of a basin with little bottom water circulation and high redox potential. Judging by the above data, Mo/Mn, V/(V+Ni), Ni/Co, total Mn and V/Cr ratios may be considered as the best to agree with redox conditions. However, almost none of them taken in itself, with the exception of Mo/Mn, is indicative enough.

Key words: *Riphean, Vendian, the South Urals, the Middle Urals, sedimentary environments, redox conditions.*

Реконструкция обстановок накопления (палеоклимат, особенности выветривания и состав пород в источниках сноса, гидродинамика, морфология и глубины бассейна, окислительно-восстановительные характеристики придонных вод и т.п.) осадочных ассоциаций разного возраста имеет важное значение для создания моделей эволюции седиментационных бассейнов [Тимофеев, 1992; Фролов, 1992; Precambrian sedimentary..., 2002 и др.]. В ряде случаев особую важность среди указанных выше факторов приобретает познание условий формирования толщ обогащенных органическим веществом, являющихся концентраторами многих экономически важных компонентов [Страхов, 1976; Буряк, 1982; Фролов, 1992; Жабин, 1997; Холодов, 2002; Гаврилов и др., 2002]. Состав и количество захороняемого в осадках органического вещества зависит, как известно, в первую очередь от биопродуктивности водоемов [Страхов, 1976; Холодов, 2002; Pedersen, Calvert, 1990 и др.]. Иногда на фоссилизацию в осадках значительных количеств органики влияет и сероводородное заражение придонных вод.

Общие вопросы формирования позднекембрийских и фанерозойских водоемов с бескислородными придонными обстановками рассмотрены в работах Н.М. Страхова [1963, 1976], В.Н. Холодова [2002; Холодов, Недумов, 1991], Ю.О. Гаврилова [2002; Гаврилов и др., 2002], Г. Дженкинса [Jenkyns, 1980], М. Артура и др. [Arthur et al., 1988], Дж. Хатча и Дж. Левентала [Hatch, Leventhal, 1992], Р. Тайсона [Tyson, 1995], И. Хильда и Г. Брамсейка [Hild, Brumsack, 1998], В. Рейчелда и Г. Брамсейка [Rachold, Brumsack, 2001] и других авторов.

Установлено, что на существование в придонных слоях, или какой-то части водной толщи, бассейнов седиментации бескислородных обстановок указывает хорошая сохранность автохтонного ОВ. Появление указанных обстановок связано в подобной ситуации с истощением запасов кислорода при расходовании его на окисление значительных объемов органического вещества. В случаях же значительной расчлененности дна бассейна осадконакопления и существования седиментационных ванн с ограниченной циркуляцией аноксидные обстановки могут возникать и при относительно низкой биопродуктивности водоемов.

Так как биопродуктивность позднекембрийских эпишлатформенных и перикратонных бассейнов была, по всей видимости, в целом ниже

их фанерозойских гомологов, то основной причиной появления довольно широко распространенных в осадочных последовательностях этого возраста черносланцевых толщ скорее всего была специфика собственно бассейнов седиментации.

По представлениям Р. Тайсона и Т. Пирсона [Tyson, Pearson, 1991], придонные воды бассейнов седиментации по степени насыщенности кислородом могут быть подразделены на четыре зоны: 1) окисную (концентрация кислорода $> 2,0 \text{ ml l}^{-1}$); 2) дисокисную ($2,0-0,2 \text{ ml l}^{-1}$); 3) субокисную ($0,2-0,0 \text{ ml l}^{-1}$) и 4) бескислородную ($0,0 \text{ ml l}^{-1}$, в осадке присутствуют сульфиды).

Для реконструкции окислительно-восстановительных обстановок придонных вод сравнительно молодых (мезозой, палеозой) седиментационных бассейнов в современной геологической литературе используются различные методы, позволяющие достаточно успешно восстановить характер газового режима наддонных вод (поведение донных организмов, биомаркеры и т.п.). Однако, для докембрийских отложений, подчас существенно измененных вторичными процессами, использовать их бывает в большинстве случаев затруднительно и на первое место выходят геохимические подходы и методики, в частности анализ вариаций различных индексов, таких как Mo/Mn , $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$, общее содержание Mn, отношения V/Mn , Mo/Co и V/Co , а также U/Th , V/Cr , Ni/Co и величина так называемого «аутигенного U» и др. [Jones, Manning, 1994 и др.]. Методической основой для выбора максимально корректных геохимических индексов является использование химических элементов (или их групп), чутко реагирующих на изменения величины редокс-потенциала и характеризующихся различным поведением в окислительных и восстановительных обстановках. Из перечисленных выше наиболее информативным и, как предполагается, универсальным, в рамках данного подхода, является отношение Mo/Mn , тогда как другие в определенной мере зависят не только от редокс-потенциала придонных вод, но и от ряда иных факторов.

Так, А.Б. Ронов [1958] в качестве индикатора устойчиво восстановительных обстановок в придонных слоях воды предложил использовать отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} < 1$, однако впоследствии было установлено, что соотношение Fe^{++} и Fe^{+++} в осадках определяется прежде всего диагенетическими процессами.

В. Эрнст [1976] для тех же целей применил отношение V/Cr . В окислительных обста-

новках значения этого индекса составляют менее 1, в восстановительных превышают 1.

По материалам В.Н. Холодова с коллегами [Холодов, Недумов, 1991; Холодов, Пауль, 1999 и др.], в бассейнах с сероводородным заражением величина отношения Mo/Mn варьирует от 0,0n до 0,п, тогда как в хорошо аэрируемых водоемах она составляет существенно менее 0,00п.

По данным М. Куинби-Ханта и П. Уайлда [Quinby-Hunt, Wilde, 1994], бескислородные обстановки осадконакопления характеризуются весьма низкими концентрациями Mn в осадках.

Никель и кобальт в кислородных обстановках ведут себя аналогично оксидам марганца; они интенсивно сорбируются из водной массы последними и, напротив, активно выводятся из оксидов марганца в субокисных и закисных обстановках [Porebska, Sawlowicz, 1997; Rachold, Brumsack, 2001].

Индекс V/(V+Ni) варьирует, по данным приведенным в работах [Hatch, Leventhal, 1992; Lewan, 1984], от 0,65–0,7 ед. в осадках накапливавшихся в умеренно бескислородных условиях до почти 1,0 в отложениях отчетливо выраженных редокс-обстановок.

Б. Джонс и А. Маннинг [Jones, Manning, 1994], на примере ряда литостратиграфических подразделений верхней юры (Draupne and Heather formations) грабена Викинг в Северном море и формации Kimmeridge Clay, распространенной в центральной части Англии, рассмотрели возможность использования для реконструкции придонных концентраций кислорода таких геохимических индексов как DOP (degree of pyritization, степень пиритизации осадков), C/S, U/Th, «аутигенный U»¹, V/Cr, Ni/Co, Ni/V и (Cu+Mo)/Zn. Названными авторами было показано, что наиболее хорошо разграничивают редокс-условия придонных вод индексы DOP, U/Th, «аутигенный U», V/Cr и Ni/Co. «Калибровка» значений Ni/Co, U/Th, V/Cr и «аутигенного U» по отношению к характеру пиритизации осадков позволила Б. Джонсу и А. Маннингу наметить количественные границы между бескис-

лородной, дисокисной и окисной зонами. Так, при значениях индексов U/Th, аутигенного U, V/Cr и Ni/Co, соответственно, более 1,25, 12,0, 4,25 и 7,0 глинистые сланцы формировались, по данным указанных авторов, в бескислородных обстановках, тогда как при величинах тех же индексов меньших, соответственно, 0,75, 5,0, 2,0 и 5,0 исходные тонкозернистые алюмосиликокластические осадки накапливались в окислительных придонных обстановках (рис. 1)².

В. Рейчалд и Г. Брамсейк [Rachold, Brumsack, 2001] считают, что показателями окислительно-восстановительных обстановок могут являться содержания в сланцах и аргиллитах таких малых элементов как V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb и Pb. В окислительных обстановках V и Cr не накапливаются в осадках, тогда как в восстановительных условиях оба элемента связываются органикой и концентрация их в осадках увеличивается. Достигающая дна бассейна медь в окислительных обстановках почти полностью растворяется и вновь переходит в морскую воду. В этих же обстановках Ni и Co сорбируются оксидами марганца; в восстановительных обстановках названные элементы, напротив, высвобождаются.

Выводы Б. Джонса и А. Маннинга могут быть проверены по данным, приведенным Ю.О. Гавриловым и др. [2002] для битуминозных нижнеаптских терригенных отложений центральных районов Русской плиты, сформированным в условиях глобального океанского аноксического события ОАЕ-1. По материалам Ю.О. Гаврилова и др., здесь могут быть выделены два типа разрезов, в которых поведение химических элементов в битуминозном горизонте и вмещающих его отложениях заметно различается. Первый из них (окрестности г. Ульяновска) характеризуется содержаниями $C_{орг}$ в битуминозных сланцах равными 6–8 % и отчетливой концентрацией S, P, Cr, Ni, V, Cu, Co, Mo, Se и Ag и представляет, по всей видимости, отложения бескислородных обстановок в их наиболее типичном виде. Второй тип разреза (окрестности г. Саратова) сложен про-

¹ Индекс бескислородных придонных обстановок «аутигенный U» предложен П. Уигнеллом и К. Майерсом [Wignall, Myers, 1988] и рассчитывается следующим образом: $U_{аут} = U_{total} - Th/3$.

² Использование большинства перечисленных выше коэффициентов требует однако определенной осторожности, так как ряд из используемых в них элементов может накапливаться в различных фракциях осадка и, следовательно, мало что давать для реконструкции редокс-обстановок.

U/Th	Аутигенный U	V/Cr	Ni/Co
Бескислородная зона			
1,25	12,0	4,25	7,0
Дисокисная зона			
0,75	5,0	2,0	5,0
Окисная зона			

Рис. 1. Корреляция значений редокс-индексов для различных по насыщенности кислородом зон придонного слоя воды, по данным приведенным в работе [Jones, Manning, 1994].

ксимальными фациями раннеаптского палеобассейна. Здесь отсутствуют осадки обогащенные ОВ, а средние содержания перечисленных выше элементов находятся на уровне кларков для глинистых пород.

В таблице 1 приведены содержания V, Cr, Ni, Co, Mo и Mn в нижнеаптских отложениях из двух указанных типов разрезов и рассчитанные по ним значения геохимических коэффициентов V/Cr, V/(V+Ni), Ni/Co и Mo/Mn. Величина отношения Mo/Mn во всех пробах нижнеаптских отложений из первого типа разреза превышает значение 0,1n, что указывает, по данным В.Н. Холодова и Р.И. Недумова [1991], на формирование осадков в бескислородных обстановках. Поразительно, но содержания Mn в битуминозных аргиллитах нижнего апта варьируют в разрезах первого типа (достоверные осадки

бескислородных обстановок – !! А.М. и др.) от 350 до 700 г/т, что более характерно для отложений хорошо аэрируемых бассейнов. Никель-кобальтовое отношение здесь ни в одном случае не достигает значения 5,00, являющегося, по мнению Б. Джонса и А. Маннинга [Jones, Manning, 1994], границей между окислительными и дисокисными обстановками, тогда как, исходя из величины коэффициента V/Cr, обстановки накопления осадков слагающих разрезы первого типа можно классифицировать как дисокисные. К такому же выводу приводит нас и значение коэффициента V/(V+Ni) (сравни: рис. 1 и табл. 1). Нижнеаптские отложения в разрезах второго типа за исключением двух проб, в которых отношение Mo/Mn варьирует от 0,0107 до 0,0110 ед., по всем трем указанным выше геохимическим показателям могут быть уве-

Таблица 1
Содержания малых элементов в нижнеаптских отложениях центральной части Русской плиты (в г/т) и значения рассчитанных по ним некоторых геохимических индексов, по данным [Гаврилов и др., 2002]

	Первый тип разреза						Второй тип разреза									
	V	250	290	375	360	400	300	140	135	140	140	123	110	123	137	135
Cr	120	115	125	125	150	125	95	107	109	95	89	85	82	107	95	100
Ni	78	88	93	90	100	90	36	39	45	40	35	35	43	52	46	44
Co	19	35	38	25	45	43	10	10	13	13	10	10	10	13	20	17
Mo	50	85	100	130	61	45	1,1	1,5	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8
Mn	500	700	560	600	420	350	100	140	160	170	110	180	180	270	350	240
V/Cr	2,08	2,52	3,00	2,88	2,67	2,40	1,47	1,26	1,28	1,47	1,38	1,29	1,50	1,28	1,42	1,23
Ni/Co	4,11	2,51	2,45	3,60	2,22	2,09	3,60	3,90	3,46	3,08	3,50	3,50	4,30	4,00	2,30	2,59
Mo/Mn	0,10	0,12	0,18	0,22	0,15	0,13	0,0110	0,0107	0,0050	0,0047	0,0073	0,0033	0,0044	0,0033	0,0023	0,0033

ренно аттестованы как образования сформированные в окислительных условиях. Из приведенных данных отчетливо следует, что, по-видимому, не все из рекомендуемых Б. Джонсом и А. Маннингом геохимических показателей редокс-обстановок придонных вод палеобассейнов информативны в одинаковой степени. В примере, приведенном Ю.О. Гавриловым и др. [2002], более или менее согласованные выводы об окислительно-восстановительных обстановках придонных вод могут быть получены только по индексам Mo/Mn , $V/(V+Ni)$ и V/Cr .

Целью настоящей работы является анализ редокс-обстановок в разнотипных седиментационных бассейнах, существовавших в раннем, среднем и позднем рифее в области сочленения Восточно-Европейской платформы и современного западного склона Южного Урала, а также в бассейнах раннего и позднего венда, располагавшихся в зоне сочленения платформы и западного склона Среднего Урала. До середины 90-х гг. прошедшего века вопросы реконструкции окислительно-восстановительных обстановок позднедокембрийских бассейнов осадконакопления практически не попадали в поле зрения исследователей. Только в публикации А.В. Маслова [1988], посвященной низкоуглеродистым отложениям типового разреза рифея, было высказано предположение, что мощные монотонные толщи темноокрашенных глинистых сланцев, наблюдающиеся на верхнеайском, нижнебакальском и ряде других уровней, могли накапливаться в относительно глубоководных и спокойных обстановках при ограниченной (?) циркуляции придонных вод. Э.З. Гареев [1989], показал существование четко выраженной тенденции к снижению величины закисного модуля ($ZM = FeO/Fe_2O_3$) в терригенных отложениях с течением времени: в доавзянских отложениях $ZM > 1$, тогда как начиная с авзянского и вплоть до куккараукского времени позднего венда $ZM < 1$. М.В. Рыкус и др. [1993] указывали на присущие терриген-

ным низкоуглеродистым отложениям суранской свиты нижнего рифея высокие значения закисного модуля ($ZM = 4,3$), объясняя их накоплением исходных осадков в условиях плохо аэрируемого бассейна. Наличие на многих уровнях нижнего и среднего рифея во время формирования низкоуглеродистых терригенных толщ осадочно-диагенетических сульфидов также является косвенным признаком существования в бассейнах седиментации этих эпох восстановительных обстановок. М.Т. Крупенин и др. [1995], основываясь на низких значениях отношения C_{org}/S (около 1) и присутствию в нижней части зигазино-комаровской свиты в окрестностях г. Бакала желваковых конкреций пирита и линзовидных прослоев диагенетических сидеритов, пришли к выводу о периодическом установлении на отдельных участках бассейна в начале зигазино-комаровского времени эвксинных обстановок.

А.Г. Низамутдинов и др. [1993] выполнили изучение рассеянного C_{org} в рифейских отложениях юго-восточной части Республики Татарстан³. Для реконструкции окислительно-восстановительных обстановок названными авторами были использованы отношения Fe_2O_3/FeO и V/Cr . По их данным, восстановительные или слабовосстановительные условия осадконакопления существовали на рассматриваемой территории в раннем рифее в конце троецкого-начале мизгиревского и в начале малокамышского времени, а в среднем рифее – в начале серафимовского времени. В позднем рифее для придонного слоя воды в бассейне были типичны окислительные условия. В целом, по представлениям А.Г. Низамутдинова и др. [1993], обстановки осадконакопления в рифее на юго-востоке Татарстана могут рассматриваться как преимущественно окислительные. Собственно восстановительные или близкие к ним условия существовали в этой части рифейских бассейнов седиментации только весьма короткое время. К аналогичным выводам пришли ранее и С.Г. Морозов с соавторами [1983].

³ Данные современных работ по стратиграфической корреляции верхнедокембрийских отложений западного склона Урала и Волго-Уральской области, материалы сейсмостратиграфических исследований и палеогеографические реконструкции вполне однозначно, как полагает большинство исследователей [Стратотип рифея..., 1983; Лозин, Хасанов, 1991; Романов, Ишерская, 1991; Стратиграфическая схема..., 2000; Глубинное строение..., 2001; Маслов и др., 2001], указывают на формирование рифейских и вендских отложений Башкирского мегантиклинория и Волго-Уральской области в единых седиментационных бассейнах.

Позднедокембрийские бассейны седиментации западного склона Южного и Среднего Урала

Литостратиграфия разрезов рифея
и венда Южного и Среднего Урала

Наиболее полные разрезы рифея (бурзянская, юрматинская и каратауская серии) известны на западном склоне Южного Урала в пределах Башкирского мегантиклинория [Стратотип рифея..., 1983; Маслов и др., 2001]. Суммарная мощность отложений рифея составляет здесь около 12–15 км.

Бурзянская серия (мощность до 5000–6500 м) объединяет айскую, саткинскую и бакальскую свиты. Нижнее подразделение *айской свиты* слагается, в основном, грубообломочными породами – конгломератами, гравелитами, грубо- и крупнозернистыми аркозовыми и граувакково-аркозовыми песчаниками, алевролитами и ассоциирующими с ними в ряде разрезов основными вулканитами. В верхней части свиты преобладают темноокрашенные глинистые сланцы, содержание $C_{орг}$ в которых варьирует в среднем от 0,4 до 0,6 % и только в редких случаях достигает 2–3,2 %. *Саткинская свита* сложена, в основном, доломитами и известняками; глинистые сланцы наблюдаются среди них в виде маломощных, достаточно редких прослоев. В средней ее части присутствует примерно 200-метровая толща глинистых и низкоуглеродистых глинистых сланцев (в ряде проб $C_{орг} > 1\%$) с редкими маломощными прослоями алевролитов и карбонатных пород (половинкинская подсвита). *Бакальская свита* представлена низкоуглеродистыми глинистыми сланцами, алевролитами, песчаниками, доломитами и известняками. В нижней ее части (до 650 м) доминируют низкоуглеродистые глинистые сланцы, среди которых иногда присутствуют алевролиты, известняки и глинистые их разности, тогда как в верхней – преимущественно низкоуглеродистые глинистые сланцы, доломиты и известняки, слагающие более или менее однородные монопородные пачки мощностью до 100–200 м. Содержания $C_{орг}$ в глинистых сланцах бакальской свиты составляют в среднем 0,6 %, при разбросе значений от 0,3 до 1,1 %.

Юрматинская серия общей мощностью порядка 5000–5500 м залегает с перерывом и угловым несогласием на бурзянской и объеди-

няет машакскую, зигальгинскую, зигазино-комаровскую и авзянскую свиты. *Машакская свита* сложена конгломератами, мелко- и среднезернистыми кварцевыми и литокласто-кварцевыми песчаниками, алевролитами, а также метабаазальтами и металипаритами. В средней части свиты присутствует примерно 200-метровая толща низкоуглеродистых глинистых сланцев (так называемая быковская подсвита). *Зигальгинская свита* сложена преимущественно мономинеральными кварцевыми песчаниками и алевролитами с маломощными прослоями глинистых сланцев и, редко, конгломератов. В восточных ее разрезах примерно в средней части наблюдается относительно маломощная пачка низкоуглеродистых глинистых сланцев и филлитов. *Зигазино-комаровская свита* представлена в основном темноцветными алевроито-глинистыми породами с прослоями песчаников, известняков и доломитов. Содержания $C_{орг}$ в глинистых сланцах данного уровня составляют в среднем 0,5–0,6 %, а в окрестностях г. Бакала в сланцах из нижней части разреза свиты достигают 4 % [Крупенин и др., 1993]. *Авзянская свита* слагается известняками, доломитами, мелкозернистыми кварцевыми и полевошпатов-кварцевыми песчаниками, алевролитами, а также глинистыми сланцами и низкоуглеродистыми разновидностями последних.

Каратауская серия (4500–5500 м) с размывом и угловым несогласием залегает на юрматинской и включает в типовых разрезах зильмердакскую, катавскую, инзерскую, миньярскую и укскую свиты. *Зильмердакская свита* подразделяется на четыре подсвиты, из которых нижняя (бирьянская) представлена преимущественно аркозовыми и субаркозовыми крупно- и среднезернистыми песчаниками, алевролитами и конгломератами, а третья снизу, лемзинская, сложена преимущественно мономиктовыми кварцевыми песчаниками. *Катавская свита* объединяет пестроцветные тонкополосчатые глинистые известняки и мергели с редкими прослоями глинистых красноцветных сланцев и плоскообломочных карбонатных брекчий. *Инзерская свита* представлена преимущественно мелкозернистыми глауконито-кварцевыми песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами. В западных районах Башкирского мегантиклинория в нижней части свиты обособляется примерно 150–200-метровая толща тонкоплитчатых сероцветных известняков. *Миньярская свита* сложена доломитами и доломитизирован-

ными известняками (как хемогенными, так и фитогенными). *Укская свита* объединяет в верхней части карбонатные, а в нижней – терригенные (кварц-глауконитовые песчаники, алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы) отложения. Черносланцевые толщи для каратавия типового региона не характерны.

Наиболее полные осадочные последовательности венда известны на западном склоне Среднего Урала, где они вскрываются многочисленными правыми притоками р. Чусовой к западу от г. Нижнего Тагила, и представлены двумя крупными осадочными сериями – серебрянской и сылвицкой [Верхний рифей..., 1982; Ключина, 1991; Стратиграфические схемы..., 1993 и др.]⁴.

Серебрянская серия объединяет снизу вверх танинскую, гаревскую, койвинскую, бутонскую и керносскую свиты [Верхний рифей..., 1982; Стратиграфические схемы..., 1993]. *Танинская свита* (до 500 м) слагается редкогалечниковыми тиллитовидными конгломератами с прослоями полевошпато-кварцевых песчаников, алевролитов и алевролитистых глинистых сланцев. *Гаревская свита* объединяет мелкозернистые песчаники и апоалевролитовые сланцы с прослоями ленточнослоистых филлитов. Мощность ее достигает 700–750 м. *Койвинская свита* (мощность до 250–300 м) представлена тонким чередованием филлитовидных апоалевролитовых сланцев, алевролитов и пестроцветных известняков. *Бутонская свита* (300–350 м) объединяет полосчатые темно-серые низкоуглеродистые глинистые сланцы с маломощными редкими прослоями алевролитов. Содержания $C_{орг}$ в тонкозернистых алюмосиликокластических породах данного уровня составляют от 1 до 1,6–1,75 %. *Керноская свита* (200–350 м) слагается песчаниками и филлитовидными алевроито-глинистыми породами.

Сылвицкая серия включает старопечнинскую, перевалокскую, чернокаменскую и устьсылвицкую свиты. *Старопечнинская свита* (до 500 м) представлена в нижней части редкогалечниковыми конгломератами; в верхней пре-

обладают темноокрашенные песчаники, алевролиты и глинистые сланцы. *Перевалокская свита* объединяет темно-серые аргиллиты, песчаники и гравелиты. Мощность ее не превышает 300 м. Выше по разрезу наблюдается мощная (до 1500–1800 м) последовательность преимущественно зеленовато-серых мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов, выделяемая в *чернокаменскую свиту*. Завершают разрез сылвицкой серии полимиктовые и полевошпато-кварцевые песчаники с маломощными прослоями алевролитов и аргиллитов *устьсылвицкой свиты*. Мощность ее 500–600 м.

Обстановки накопления осадочных последовательностей рифея и венда западного склона Южного и Среднего Урала

Раннерифейские осадочные последовательности выполняют в настоящее время широкую платформенную впадину с раздробленным фундаментом и представлены как грубообломочными красно- и сероцветными континентальными и прибрежно-морскими терригенными образованиями, так и темноокрашенными осадками умеренно глубоководных обстановок, формировавшимися, по всей видимости, в условиях ограниченной циркуляции. Накоплению среднерифейских образований предшествовала перестройка структурного плана. В начале среднего рифея на востоке Башкирского мегантиклинория формируется, по всей видимости, относительно узкая рифтовая (?) депрессия, где геологически почти мгновенно, накопились вулканогено-осадочные последовательности машакской свиты (мощность до 3000–3300 м). Впоследствии преобладающее развитие в разрезах среднего рифея получили терригенные прибрежно- и мелководно-морские отложения и только в середине среднего рифея (на уровне примерно 1220 млн лет) в области осадконакопления появились мелководные карбонатные и терригенно-карбонатные последовательности (авзянская свита). На рубеже среднего и по-

⁴ В настоящей работе мы придерживаемся устоявшегося на Урале отнесения серебрянской серии к нижнему венду. Однако, резкое омоложение в последние годы границы рифея и венда (с 650 до 600 млн лет, см. [Семихатов, 2000 и др.] ставит принадлежность отложений танинской, гаревской, койвинской, бутонской и керносской свит к нижнему венду под большое сомнение.

зднего рифея область седиментации, существовавшая в пределах современного Башкирского мегантиклинория, вновь испытала осушение и размыв ранее накопившихся отложений [Маслов, Анфимов, 2000; Маслов и др., 2001].

Первичные седиментационные текстуры пород всех трех седиментационных серий рифея Башкирского мегантиклинория исключительно разнообразны и указывают на накопление исходных осадков преимущественно в шельфовых обстановках. Детальные литолого-фациальные исследования позволяют реконструировать в разрезах типа рифея отложения многорусловых аллювиальных, аллювиально-дельтовых и прибрежно-континентальных равнин, литоральных, перилиторальных и мелководно-морских зон бассейнов (выше уровня штормового волнения), характеризующихся широким развитием различных типов косой, перекрестной, фестончатой, линзовидной и линзовидно-волнистой, волнистой, косо- и пологоволнистой, флазерной, клиновидной и мульдовидной, горизонтальной и субгоризонтальной, конвюлютной и градационной слоистости, а также знаков ряби волнения и течения, трещин усыхания, микро-размывов и борозд размыва, псевдоморфоз по галиту и сульфатным минералам, гиероглифов различных типов, текстур нагрузки, слепков струй течения, отпечатков капель дождя, интракластитовых сланцевых брекчий в подошвах песчаных пластов, врезанных русел, текстур обезвоживания осадков и др. В разрезах карбонатных подразделений можно видеть строматолитовые постройки разных типов, прослои и линзы синседиментационных интракластитовых брекчий, трещины усыхания и синерезиса, псевдоморфозы кремнезема по галиту, а также различные типы слоистости и т.д.

Архитектура фациальных ассоциаций и слагаемых ими более крупных единиц – осадочных комплексов – в разрезах бурзянской, юрматинской и каратауской серий свидетельствует, что для каждой из них характерно «свое лицо». Развитие бассейнов осадконакопления, существовавших в области сочленения восточных районов Русской платформы и западного склона Южного Урала в раннем, среднем и позднем рифее происходило в специфических для каждого из этих крупных этапов, палеотектонических, палеогеографических и палеоклиматических обстановках [Маслов и др., 2001, 2002; Маслов, Ишерская, 2002]. Накопление осадков происходило в основном в семиаридных обста-

новках, существенно менее продолжительными были гумидные и субгляциальные эпохи. Среди карбонатных и силикокластических осадочных образований рифея основное место занимают мелководные и прибрежно-бассейновые отложения. В целом рифейская история седиментационных бассейнов рассматриваемой территории может быть разбита на два неравных по продолжительности этапа: ранне-среднерифейский и позднерифейский. В раннем и среднем рифее основными типами седиментационных бассейнов на рассматриваемой территории были относительно небольшие эпикратонные моря с различного размера седиментационными ваннами, где накапливались тонкозернистые алюмосиликокластические осадки значительной мощности. Особенности строения и пространственного распределения осадочных образований каратауской серии и ее аналогов позволяют предполагать появление в середине позднего рифея крупного перикратонного бассейна, охватившего всю восточную и северо-восточную периферию Восточно-Европейского кратона [Маслов и др., 2002; Маслов, Ишерская, 2002].

Имеющиеся в литературе представления об условиях формирования серебрянской и сylvицкой серий до сих пор весьма отрывочны и опубликованы преимущественно в 50-70-х гг. прошедшего столетия.

Так, А.А. Кухаренко [1962] полагал, что начало «ашинского времени» на Среднем Урале было ознаменовано обмелением бассейна, сопровождавшимся появлением архипелага островов. Ярко выраженное двучленное строение разреза серии отражает, по мнению А.А. Кухаренко, проявление двух циклов осадконакопления несколько различавшихся по набору основных литотипов. Исходя из текстурно-структурных особенностей отложений всей ашинской серии, он также считал, что накопление исходных осадков происходило преимущественно в мелководной прибрежной зоне морского бассейна (литораль и неритовая область). По мнению названного автора, формирование песчаников верхов ашинской свиты происходило в мелководной прибрежной зоне; а красноватая окраска пород обусловлена «... наличием тонкого пигмента за счет вулканических извержений» [Кухаренко, 1962, с. 256].

По данным М.Л. Ключиной [1969], исходя из особенностей слоистости, отложения самого верхнего подразделения ашинской серии

– усть-сылвицкой свиты – следует рассматривать как прибрежно-морские или континентальные. Обилие в породах косослоистых текстур волнового и потокового типа свидетельствует об активной динамике бассейна, носившего, вероятно, регрессивный характер.

Исходя из присутствия пачек и прослоев карбонатных пород, наличия тонкослоистых глинистых сланцев с повышенными содержаниями P_2O_5 , геохимических особенностей отложений, широкого развития оползневых и турбидитовых текстур, считается, что осадочные образования серебрянской серии накапливались в морском бассейне линейного типа, имевшем, по всей видимости, значительную расчлененность [Младших, Аблизин, 1967; Курбацкая, Аблизин, 1970; Ключина, 1991; Маслов, 2000а, 2000б]. По-видимому, именно расчлененность дна способствовала появлению в ранневендском бассейне обстановок с ограниченной циркуляцией.

По представлениям Н.М. Чумакова [1996], отложения танинской и верхней части койвинской свит отвечают ледниковой формации активных тектонических прогибов, тогда как породы гаревской и нижней части койвинской свит являются межледниковыми образованиями. Микститы танинской свиты рассматриваются Н.М. Чумаковым как отложения подводного конуса выноса ледниковых вод.

Е.М. Аксенов [1998] указывает на формирование в раннем венде в пределах западного склона Среднего Урала преимущественно моренных, водно-ледниковых и озерно-ледниковых отложений, тогда как в позднем венде преобладающее развитие получили терригенные прибрежно- и мелководно-морские последовательности, формировавшиеся в условиях хорошо выраженных ингрессивной, трансгрессивной и регрессивной стадий развития бассейна.

Реконструкция редокс-обстановок позднего докембрия седиментационных бассейнов

Для оценки редокс-обстановок в рифейских седиментационных бассейнах западного склона Южного Урала нами использована выборка из 18 средних проб⁵, составленных по

3–4 конкретным пробам, отобранным из большинства литостратиграфических единиц типового разреза рифея и проанализированных методом ISP-MS на 41 элемент. Содержания V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Th и U в средних пробах и вычисленные по ним геохимические индексы приведены в табл. 2.

Раннерифейский бассейн. Значения индекса Mo/Mn в глинистых сланцах бурзянской серии варьируют от 0,001 до 0,0063 ед., что позволяет предполагать отсутствие в раннем рифее бескислородных обстановок. Максимально высокие значения Mo/Mn типичны для массивных и тонкополосчатых низкоуглеродистых глинистых сланцев макаровской подсвиты бакальской свиты (рис. 2), но в целом они существенно ниже, чем те, что типичны, по представлениям В.Н. Холодова и Р.И. Недумова, для отложений аноксических бассейнов.

Содержание Mn в глинистых сланцах варьирует преимущественно в пределах 40–300 г/т и только в глинистых сланцах малобакальской подсвиты бакальской свиты увеличивается до более 650 г/т.

Величина индекса $V/(V+Ni)$ составляет от 0,63 до 0,74 условных ед., что позволяет рассматривать глинистые сланцы бурзянской серии, исходя из критериев, приведенных в работах [Hatch, Leventhal, 1992; Lewan, 1984], как отложения умеренно бескислородных обстановок.

Существенно иначе оцениваются условия накопления исходно глинистых отложений бурзянской серии по индексам U/Th, аутигенный U, V/Cr и Ni/Co. Первый из них варьирует от 0,14 до 0,21, второй меняется в пределах от –3,22 до ... –0,81 ед. Отношение V/Cr составляет минимально 0,44 ед. в глинистых сланцах нижнекусинской подсвиты саткинской свиты, а максимально – 1,02 ед. в глинистых сланцах половинкинской подсвиты той же свиты. Наконец, индекс Ni/Co меняется от 2,31 до 3,44 ед. Нетрудно видеть, что значения всех названных индексов характеризуют, как и отношение Mo/Mn, отложения сформированные в условиях достаточно хорошей аэрированности бассейна.

Среднерифейский бассейн. Максимальная величина отношения Mo/Mn в глинистых сланцах юрматинской серии среднего рифея не

⁵ Пробы глинистых сланцев в большинстве случаев отобраны из монотонных, преимущественно сланцевых, интервалов и в такой ситуации, на наш взгляд, вполне оправданно использование усредненных данных.

Таблица 2

Содержания ряда малых элементов в средних пробах глинистых сланцев
типа рифей (в г/т) и рассчитанные по ним некоторые геохимические индексы

	Нижний рифей						Средний рифей						Верхний рифей					
	ai ₁	ai ₂	st ₁	st ₃	b ₁	b ₂	msh ₃	zk	av ₁	av ₂	av ₄	zl ₁	zl ₂	zl ₄	kt	in	mn	uk ₁
V	119,84	85,67	77,46	105,95	107,90	104,16	154,46	78,64	69,85	129,27	79,86	93,37	80,60	97,83	93,03	87,03	83,58	44,93
Cr	179,52	111,66	177,00	104,09	132,93	130,58	174,37	113,00	91,88	161,57	122,58	231,78	116,77	157,91	132,05	95,76	110,59	64,27
Mn	73,15	297,45	44,49	210,21	195,84	667,50	261,35	661,06	197,42	94,95	32,42	177,51	226,44	384,61	54,21	151,44	60,41	89,14
Co	17,63	12,78	14,00	19,20	17,60	19,01	32,82	9,86	9,66	13,35	14,17	13,63	18,07	22,70	10,35	16,51	8,65	14,73
Ni	60,68	29,46	44,73	46,20	60,34	61,14	89,57	26,92	37,19	51,10	47,66	91,22	70,43	58,04	29,92	36,08	23,03	23,98
Mo	0,20	0,30	0,11	0,31	1,23	0,91	0,31	0,33	0,12	0,31	0,12	4,73	0,28	0,46	0,17	0,36	1,63	0,20
Th	4,29	13,50	13,88	14,41	17,18	15,40	12,32	10,88	8,86	11,96	15,38	15,46	12,28	15,42	13,93	16,63	15,45	9,68
U	0,63	2,82	1,90	1,95	2,50	2,14	2,52	2,03	1,59	2,13	2,28	4,56	2,66	2,97	1,41	3,02	4,83	1,63
Mo/Mn	0,0027	0,0010	0,0025	0,0015	0,0063	0,0014	0,0012	0,0005	0,0006	0,0033	0,0037	0,0266	0,0012	0,0012	0,0031	0,0024	0,0270	0,0022
V/(V+Ni)	0,66	0,74	0,63	0,70	0,64	0,63	0,63	0,74	0,65	0,72	0,63	0,51	0,53	0,63	0,76	0,71	0,78	0,65
Mn	73,15	297,45	44,49	210,21	195,84	667,50	261,35	661,06	197,42	94,95	32,42	177,51	226,44	384,61	54,21	151,44	60,41	89,14
V/Co	6,80	6,70	5,53	5,52	6,13	5,48	4,71	7,98	7,23	9,68	5,64	6,85	4,46	4,31	8,99	5,27	9,66	3,05
Mo/Co	0,01	0,02	0,01	0,02	0,07	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,35	0,02	0,02	0,02	0,02	0,19	0,01
V/Mn	1,64	0,29	1,74	0,50	0,55	0,16	0,59	0,12	0,35	1,36	2,46	0,53	0,36	0,25	1,72	0,57	1,38	0,50
U/Th	0,15	0,21	0,14	0,14	0,15	0,14	0,20	0,19	0,18	0,18	0,15	0,29	0,22	0,19	0,10	0,18	0,31	0,17
Aut U	-0,81	-1,68	-2,73	-2,85	-3,22	-2,99	-1,59	-1,60	-1,36	-1,86	-2,85	-0,59	-1,43	-2,18	-3,24	-2,52	-0,32	-1,60
V/Cr	0,67	0,77	0,44	1,02	0,81	0,80	0,89	0,70	0,76	0,80	0,65	0,40	0,69	0,62	0,70	0,91	0,76	0,70
Ni/Co	3,44	2,31	3,20	2,41	3,43	3,22	2,73	2,73	3,85	3,83	3,36	6,69	3,90	2,56	2,89	2,19	2,66	1,63

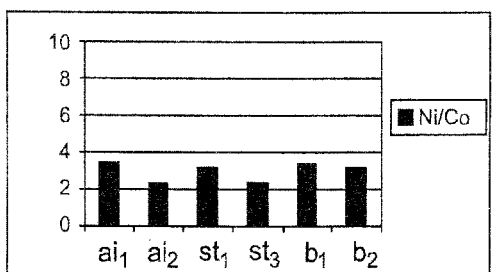
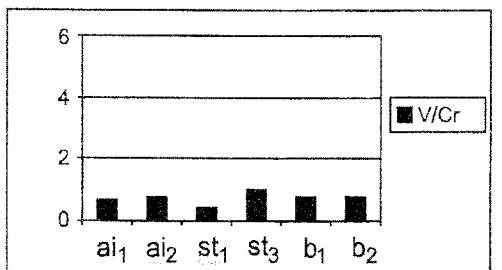
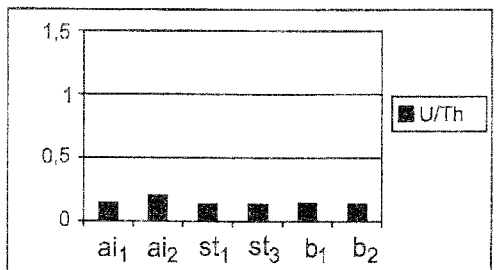
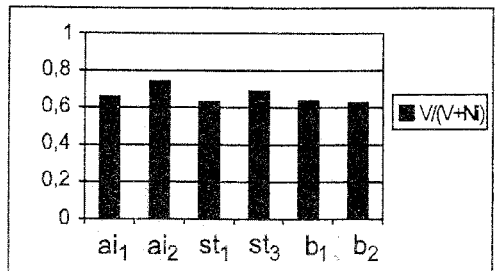
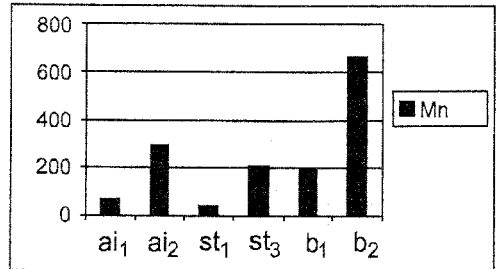
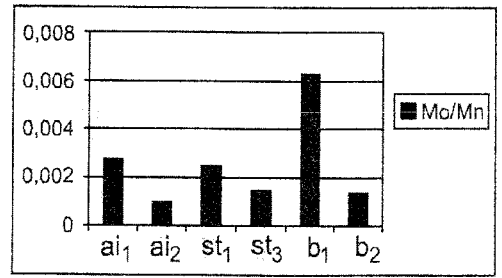
Примечание. Индексами показаны: ai₁ – нижнее подразделение айской свиты; ai₂ – верхнее подразделение айской свиты; st₁ – нижнекусинская подсвита саткинской свиты; st₃ – половинкинская подсвита саткинской свиты; b₁ – макаровская подсвита бакальской свиты; b₂ – малобакальская подсвита бакальской свиты; msh₃ – быковская подсвита машакской свиты; zk – зигазино-комаровская свита; авянская свита: (av₁ – катаскинская подсвита; av₂ – малонинерская подсвита; av₄ – културская подсвита); зильмердакская свита: (zl₁ – бирьянская подсвита; zl₂ – нугушская подсвита; zl₄ – бедерышинская подсвита); kt – катавская свита; in – инзерская свита; mn – миллиарская свита; uk₁ – нижняя подсвита укской свиты.

Рис. 2. Вариации отношения Mo/Mn , Mn , $V/(V+Ni)$, U/Th , V/Cr и Ni/Co в средних пробах глинистых сланцев различных подразделений нижнего рифея Башкирского мегантиклинория.

ai_1 – нижнее подразделение айской свиты; ai_2 – верхнее подразделение айской свиты; st_1 – нижнекусинская подсвита саткинской свиты; st_3 – половинкинская подсвита саткинской свиты; b_1 – макаровская подсвита бакальской свиты; b_2 – малобакальская подсвита бакальской свиты.

превышает 0,0037 ед. (рис. 3), что указывает на накопление исходных тонкозернистых алюмосиликокластических осадков в обстановках хорошо аэрируемого бассейна. На это же указывают величины индексов U/Th , аутигенного U , V/Cr и Ni/Co и только по величине отношения $V/(V+Ni)$, составляющей на разных литостратиграфических уровнях юрматинской серии от 0,63 до 0,74 ед., можно предполагать преобладание в среднерифейском бассейне умеренно бескислородных условий.

Позднерифейский бассейн. Глинистые сланцы большинства литостратиграфических подразделений каратауской серии характеризуются значениями индексов Mo/Mn , $V/(V+Ni)$, U/Th , аутигенный U , V/Cr и Ni/Co типичными для отложений хорошо аэрировавшихся бассейнов (рис. 4). Особняком в этом ряду стоят красноцветные глинистые сланцы (мелкозернистые алевролиты) бирьянской подсвиты зильмердакской свиты и темно-серые или почти черные аргиллиты, наблюдающиеся в виде маломощных (3–5 см) прослоев в средней части миньярской свиты. Отношение Mo/Mn составляет в названных породах 0,027 ед., но если, исходя из общегеологических соображений и данных микрофациальных исследований, для аргиллитов миньярского уровня вполне обоснованно можно предполагать накопление в бескислородных обстановках, то глинистые сланцы (мелкозернистые алевролиты) бирьянского уровня, ассоциирующие с аллювиально-дельтовыми образованиями семиаридного и аридного климата, скорее всего не являются отложениями бескислородных обстановок⁶.



⁶ Справедливости ради следует отметить, что в аридных условиях бескислородные обстановки также возможны в озерных котловинах с ограниченной циркуляцией придонных вод, существовавших на дельтовых или прибрежно-континентальных равнинах.

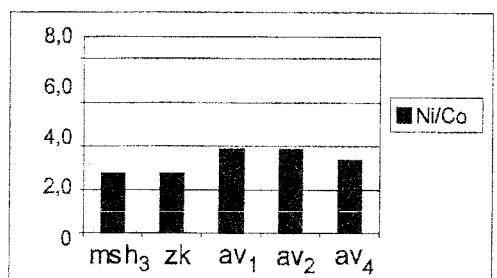
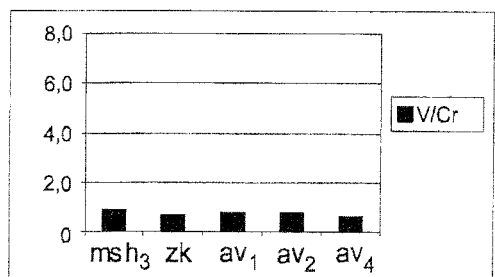
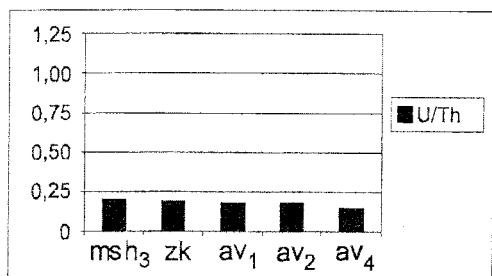
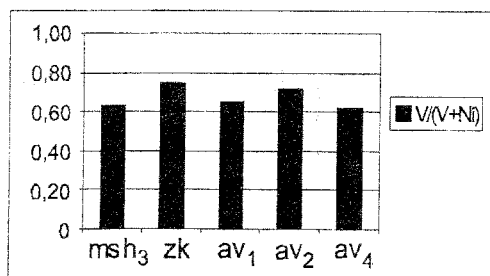
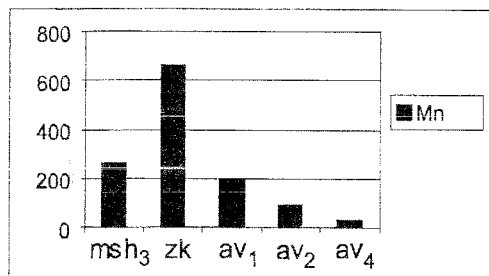
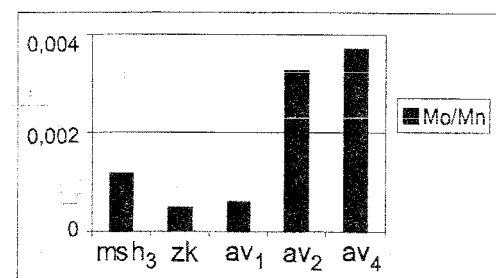


Рис. 3. Вариации отношения Mo/Mn, Mn, V/(V+Ni), U/Th, V/Cr и Ni/Co в средних пробах глинистых сланцев различных подразделений среднего рифея Башкирского мегантиклинория.

msh₃ – быковская подсвита машакской свиты; zk – зигазино-комаровская свита; авзянская свита; (av₁ – катаскинская подсвита; av₂ – малоинзерская подсвита; av₄ – куткурская подсвита).

Таким образом, суммируя все сказанное выше, можно и на более широкой аналитической и геохимической базе прийти к ранее сделанному нами [Маслов и др., 2001] выводу о том, что в рифейских бассейнах осадконакопления западного склона Южного Урала аноксических обстановок не существовало. Следует отметить, что более или менее согласовано в случае миньярских аргиллитов вели себя такие геохимические индексы как Mo/Mn и V/(V+Ni), хотя последний практически все глинистые сланцы и аргиллиты типового разреза рифея аттестует как образования дисокисных обстановок. Общее содержание марганца в тонкозернистых алюмосиликокластических породах всех без исключения литостратиграфических уровней рифея западного склона Южного Урала, а также значения коэффициентов U/Th, V/Cr и Ni/Co указывают, напротив, на формирование их в хорошо аэрировавшихся бассейнах.

Для оценки редокс-обстановок в ранне- и поздневендском бассейнах западного склона Среднего Урала использована коллекция из 27 проб глинистых сланцев и аргиллитов серебрянской (танинская, гаревская, койвинская и бутонская свиты) и сылвицкой (старопечнинская, перевалокская и чернокаменная свиты) серий, проанализированных на 41 элемент методом ISP-MS. Средние для 3–4 проб из каждого литостратиграфического интервала венда содержания V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Th и U и значения рассчитанных по ним индексов приведены в табл. 3.

Отношение Mo/Mn в глинистых сланцах и аргиллитах подавляющего большинства литостратиграфических единиц серебрянской и сылвицкой серий не превышает 0,0025–0,003 условных ед. (рис. 5), что предполагает стабильно хорошую аэрацию придонного слоя воды. Единственным исключением здесь являются глинистые сланцы бутонской свиты – в них Mo/Mn превышает 0,015 ед. и, следовательно, исходя из критерия В.Н. Холодова и его коллег, бассейн

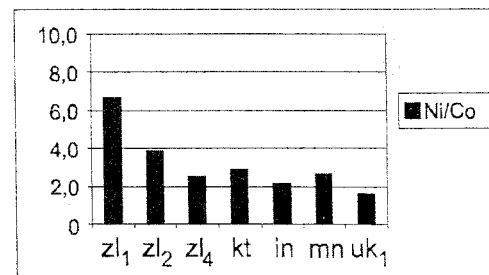
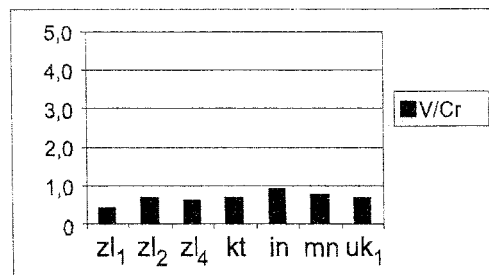
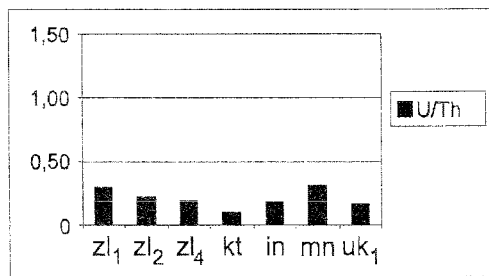
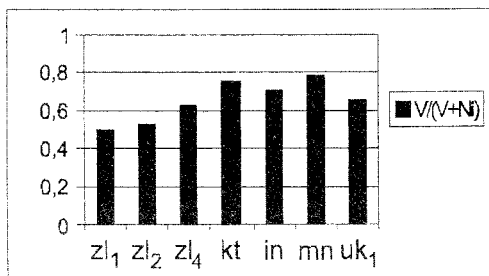
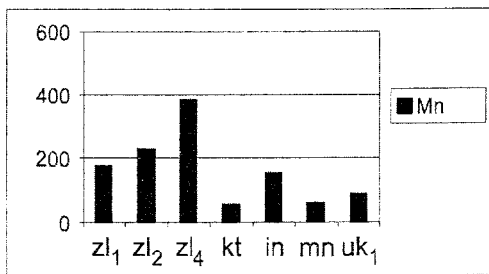
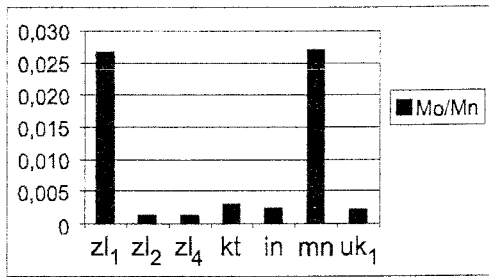


Рис. 4. Вариации отношения Mo/Mn, Mn, V/(V+Ni), U/Th, V/Cr и Ni/Co в средних пробах глинистых сланцев различных подразделений верхнего рифея Башкирского мегантиклинория.

Зильмердакская свита: (zl₁ – бирьянская подсвита; zl₂ – нугушская подсвита; zl₄ – бедерышинская подсвита); kt – катавская свита; in – инзерская свита; mn – миньярская свита; uk₁ – нижняя подсвита укской свиты.

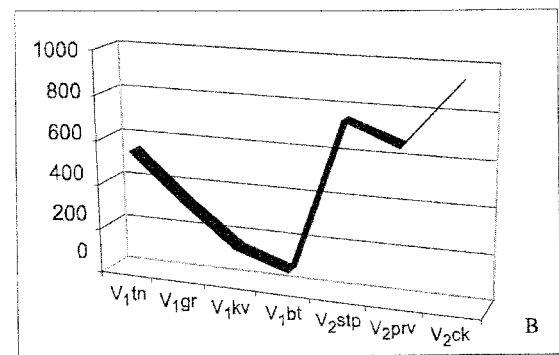
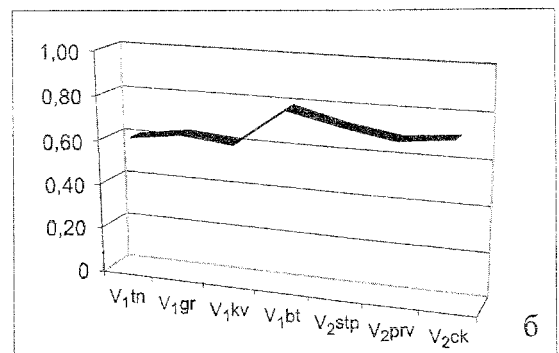
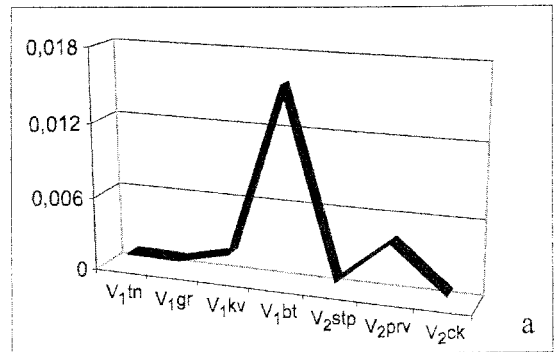


Рис. 5. Вариации индексов Mo/Mn (а), V/(V+Ni) (б) и содержания Mn (в) в глинистых сланцах и аргиллитах серебрянской и сыльвицкой серий венда западного склона Среднего Урала.

Свиты: V₁tn – танинская; V₁gr – гаревская; V₁kv – койвинская; V₁bt – бутонская; V₂stp – старопечнинская; V₂prv – перевалокская; V₂ck – чернокаменная.

Содержания некоторых малых элементов в средних пробах глинистых сланцев из некоторых литостратиграфических интервалов нижнего и верхнего венда западного склона Среднего Урала и значения рассчитанных по ним индексов

	Нижний венд				Верхний венд		
	V _{1tn}	V _{1gr}	V _{1kv}	V _{1bt}	V _{2stp}	V _{2prv}	V _{2ck}
V	81,86	125,91	73,3	99,96	112,77	122,08	115,37
Cr	137,43	129,74	109,61	104,35	90,35	133,94	108,84
Mn	544,81	340,81	156,71	74,82	759,18	666,87	942,02
Co	12,2	15,82	13,58	4,69	16,55	17,93	15,01
Ni	52,5	70,26	45,2	26,85	41,1	54,35	45,5
Mo	0,61	0,35	0,33	1,18	0,65	2,94	0,73
Th	12,57	15,16	12,91	14,38	14,32	13	15,41
U	1,88	1,88	1,43	2,44	1,83	1,95	2,54
Mo/Mn	0,0011	0,001	0,0021	0,0158	0,0009	0,0044	0,0008
V/(V+Ni)	0,61	0,64	0,62	0,79	0,73	0,69	0,72
Mn	544,81	340,81	156,71	74,82	759,18	666,87	942,02
V/Co	6,71	7,96	5,4	21,32	6,81	6,81	7,69
Mo/Co	0,05	0,02	0,02	0,25	0,04	0,16	0,05
V/Mn	0,15	0,37	0,47	1,34	0,15	0,18	0,12
U/Th	0,15	0,12	0,11	0,17	0,13	0,15	0,16
Aut U	-2,31	-3,17	-2,88	-2,35	-2,95	-2,38	-2,6
V/Cr	0,6	0,97	0,67	0,96	1,25	0,91	1,06
Ni/Co	4,3	4,44	3,33	5,73	2,48	3,03	3,03

Примечание. V_{1tn} – танинская свита; V_{1gr} – гаревская свита; V_{1kv} – койвинская свита; V_{1bt} – бутонская свита; V_{2stp} – старопечнинская свита; V_{2prv} – перевалокская свита; V_{2ck} – чернокаменная свита.

бутонского времени может рассматриваться как бассейн с отчетливо выраженными бескислородными обстановками осадконакопления.

Менее определенные интерпретации допускает величина отношения V/(V+Ni), варьирующая в глинистых сланцах и аргиллитах серебрянской и сылвицкой серий от 0,61 до 0,79 ед. Основываясь на представлениях, высказанных в работах [Hatch, Leventhal, 1992; Lewan, 1984], можно сделать заключение о преобладании в бассейнах седиментации на всем протяжении венда умеренно бескислородных обстановок. Максимально высокое значение индекса V/(V+Ni) характерно для исходно глинистых пород бутонской свиты, что позволяет рассматривать их, так же как и по параметру Mo/Mn, как отложения сформированные в условиях достаточно хорошо выраженных редокс-обстановок.

Исключительно ярко на бутонском уровне нижнего венда выражен экскурс в сторону минимальных значений общего содержания мар-

ганца. По сравнению с глинистыми сланцами и аргиллитами старопечнинской или чернокаменной свит верхнего венда в породах бутонской свиты % Mn снижены более чем на порядок (!! – А.М. и др.). Примечательно, что, за исключением глинистых сланцев танинской свиты, средние содержания Mn в отложениях нижнего венда в целом в 2–3 раза ниже, чем в верхневендской последовательности.

Отношения V/Co, Mo/Co и V/Mn в глинистых сланцах и аргиллитах серебрянской и сылвицкой серий фиксируют уже обозначенную выше тенденцию: максимальные значения указанных индексов типичны для бутонского уровня нижнего венда (рис. 6).

Интересно проанализировать поведение в разрезе венда западного склона Среднего Урала индексов U/Th, аутигенный U, V/Cr и Ni/Co. Так, индекс U/Th ни для одного литостратиграфического уровня, в том числе и для бутонского (0,17 ед.), не достигает величины 0,75, раз-

Рис. 6. Вариации индексов V/Co (а), Mo/Co (б) и V/Mn (в) в глинистых сланцах и аргиллитах се-ребрянской и сыльвицкой серий венда западного склона Среднего Урала.

Условные обозначения см. на рис. 5.

деляющей осадки окислительных и дисокисных обстановок. Величина аутигенного U не выходит из области отрицательных значений, составляя -3,17 ед. в глинистых сланцах гаревской свиты (минимум) и -2,31 – в сланцах танинской свиты (максимум). Отношение V/Cr во всех случаях также существенно ниже 2,0 ед. – границы между окислительными и дисокисными обстановками и только по индексу Ni/Co можно видеть, что глинистые сланцы бутонской свиты принадлежат осадкам дисокисной зоны, тогда как исходно глинистые образования всех других уровней нижнего и верхнего венда являются отложениями хорошо аэрировавшегося бассейна.

Если обратиться к методу, использованному В. Рейчалд и Г. Брумсейком [Rachold, Brumsack, 2001] при реконструкции редокс-обстановок в позднеальбском бассейне Нижней Саксонии, то мы увидим, что содержания V в глинистых сланцах и аргиллитах большинства литостратиграфических подразделений нижнего и верхнего венда Среднего Урала либо примерно соответствуют тем, что характерны для «среднего сланца», либо заметно ниже их (табл. 4). Содержания хрома в большей части проанали-

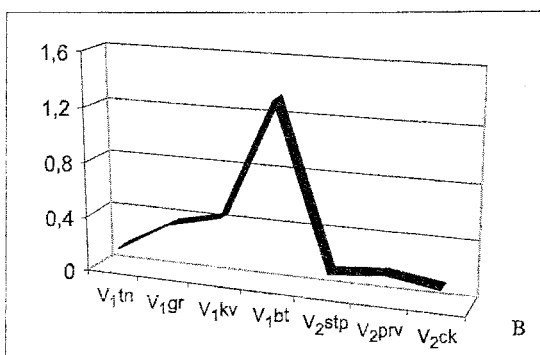
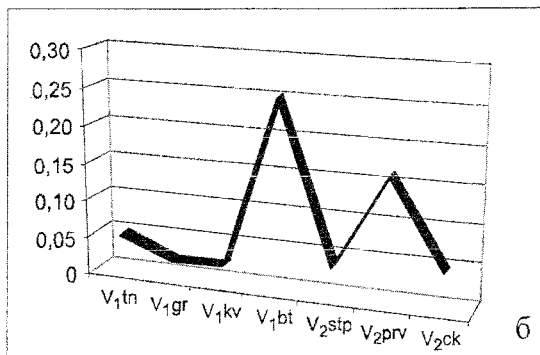
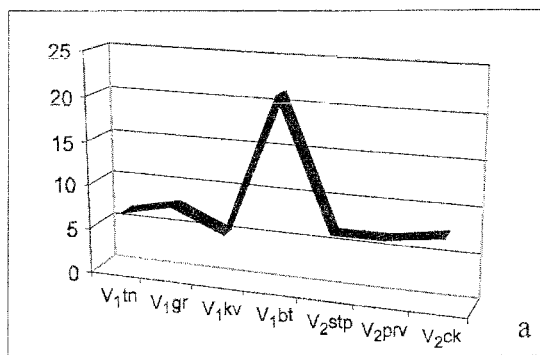


Таблица 4

Средние содержания (в г/т) некоторых малых элементов в глинистых сланцах нижнего и верхнего венда Среднего Урала по сравнению со «средним сланцем»

	Средний сланец		V _{1tn}	V _{1gr}	V _{1kv}	V _{1bt}	V _{2stp}	V _{2prv}	V _{2ck}
	а	б							
V	130	150	82	126	73	100	113	122	115
Cr	90	110	137	130	110	104	90	134	109
Co	19	23	12	16	14	5	17	18	15
Ni	68	55	52	70	45	27	41	54	46
Cu	45	50	14	30	10	15	18	18	18
Zn	95	85	68	103	65	68	83	80	94
Pb	22	20	12	18	5	19	10	14	30

Примечание. Состав «среднего сланца» приведен по работам: а – [Wedepohl, 1971, 1991], б – [Тейлор, МакЛеннан, 1988]. Значения индексов те же, что и в табл. 3.

Раннеаптский седиментационный бассейн	Геохимические индексы-индикаторы редокс-обстановок				
	Mo/Mn	Mn	V/(V+Ni)	U/Th	V/Cr
Первый тип разрезов	Бескислородная обстановка	Окисная обстановка	Суб- и дисокисные обстановки	н/о	Суб- и дисокисные обстановки
					Ni/Co Окисная обстановка

Рис. 7. Реконструируемые по различным геохимическим индексам окислительно-восстановительные условия накопления битуминозных сланцев первого типа разрезов нижнего апта центральных районов Русской плиты.
н/о – входящие в состав индекса элементы не определялись.

Седиментационные бассейны	Время	Геохимические индексы-индикаторы редокс-обстановок				
		Mo/Mn	Mn	V/(V+Ni)	U/Th	V/Cr
Раннерифейский	Бирьянское	?		Суб- и дисокисные обстановки		
	Нугушско-лемезинское					
Позднерифейский	Белерышинское					
	Катавское					
	Инзерское					
	Миньярское	Бескислородные обстановки		Суб- и дисокисные обстановки		
	Уское					
Ранневендский	Танинское					
	Гаревское					
	Койвинское					
Поздневендский	Бутонское			Бескислородные обстановки		
	Старопечнинское					
	Перевалокское					
	Чернокаменское			Суб- и дисокисные обстановки		

О к и с н ы е о б с т а н о в к и

Рис. 8. Реконструируемые по различным геохимическим индексам окислительно-восстановительные условия накопления низкоуглеродистых глинистых сланцев рифея и венда западного склона Южного и Среднего Урала.

зированных нами проб сходны с концентрациями Cr в «среднем сланце», но в части проб, напротив, несколько выше. Содержания меди на всех уровнях разреза венда, в том числе и на бутонском, заметно ниже, чем в «среднем сланце», что указывает, по всей видимости, на преобладание окислительных обстановок в ранне- и поздневендском бассейнах. Концентрации Ni, Co и Zn в сланцах и аргиллитах серебрянской и сыльвицкой серий, за редким исключением, более низкие, нежели в «среднем сланце»; в глинистых сланцах бутонского уровня они ниже в 3–4 раза, чем на других уровнях разреза венда. Основываясь на указанных признаках, глинистые сланцы бутонского уровня могут быть более или менее условно отнесены к образованиям, накопившимся в восстановительных обстановках.

Приведенные выше данные показывают, что для вендских седиментационных бассейнов западного склона Среднего Урала только использование таких геохимических индексов как Mo/Mn, V/(V+Ni), общее содержание Mn и Ni/Co, позволяет вполне определенно рассматривать время накопления мощных исходно глинистых толщ бутонского уровня как эпоху существования на рассматриваемой территории бассейна с резко ограниченной циркуляцией придонных вод и их высоким редокс-потенциалом. Большинство других геохимических индексов не позволяют значительно разграничить окислительно-восстановительные обстановки придонных вод бассейнов раннего и позднего венда.

Основываясь на наблюдаемом последовательном уменьшении общего содержания Mn в глинистых сланцах гаревской, койвинской и бутонской свит, можно, в первом приближении, предполагать что ранневендский бассейн испытывал тенденцию к постепенной изоляции. В позднем венде эта тенденция сменилась обширной трансгрессией, что привело, как известно [Вендская система..., 1985; Соколов, 1998; Стратиграфический словарь..., 1994], к резким палеоэкологическим перестройкам, в том числе к широкому расселению в шельфовых бассейнах поздневендских Metazoa.

Таким образом, исходя из приведенных выше данных по раннеаптскому седиментационному бассейну центральной части Русской плиты, ранне- и поздневендским бассейнам западного склона Среднего Урала и рифейским бассейнам западного склона Южного Урала, можно видеть, что наиболее согласующимися индексами редокс-обстановок

являются отношения Mo/Mn, V/(V+Ni), Ni/Co, Mn и V/Cr (рис. 7, 8). Однако, ни одно из них поодиночке, за исключением Mo/Mn, не является достоверным показателем окислительно-восстановительных обстановок в придонном слое бассейнов седиментации.

Авторы искренне признательны Ю.Л. Ронкину, О.П. Лепихиной и О.Ю. Поповой за подготовку, химическое разложение проб глинистых сланцев и аргиллитов рифея и венда и их анализ. Существенную роль при подготовке настоящей работы сыграло ознакомление с современными зарубежными публикациями по данной теме, чему в решающей степени способствовали д-р Р. Эльмис и д-р П. Керер (BRG, Германия), д-р Л. Карстен (EITEP, Германия) и д-р С. Филиппов, а также Д.В. Гражданкин (Кембриджский университет). Окончательная доработка текста статьи и иллюстраций выполнена с учетом ряда критических замечаний, высказанных в подробном и доброжелательном отзыве Ю.О. Гаврилова и Е.В. Щепетовой.

Исследования по данной теме выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 00-05-64497 и 03-05-64121) и гранта «Ведущие научные школы» (НШ-85.2003.5).

Список литературы

- Аксенов Е.М. История геологического развития Восточно-Европейской платформы в позднем протерозое: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук в форме научного доклада. С-Пб: ИГГДРАН, 1998. 106 с.
- Буряк А.В. Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982. 256 с.
- Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы / Под ред. Б.С. Соколова и М.А. Федонкина. М.: Наука, 1985. 222 с.
- Верхний рифей и венд западного склона Среднего Урала / Под ред. В.Е. Хаина и Б.И. Чувашева. М.: Наука, 1982. 139 с.
- Гаврилов Ю.О. Динамика формирования юрского терригенного комплекса Большого Кавказа: седиментология, геохимия, постседиментационные преобразования: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2002. 52 с.
- Гаврилов Ю.О., Щепетова Е.В., Барабошкин Е.Ю., Щербинина Е.А. Аноксический раннемеловой бассейн Русской плиты: седиментология и геохимия // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 4. С. 359–380.
- Гареев Э.З. Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея: Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ, 1989. 24 с.

Глубинное строение и геодинамика Южного Урала. Проект Уралсейс. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2001. 286 с.

Жабин А.Г. Рудоподготовительные процессы в черносланцевых осадочных формациях // Отечественная геология. 1997. № 6. С. 35–40.

Клюжнина М.Л. Литология и условия образования ашинской серии Среднего Урала: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГГ УФАН СССР, 1969. 220 с.

Клюжнина М.Л. Вендская система Урала. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1991. 58 с.

Крупенин М.Т., Ятлук Г.М., Маслов А.В. К оценке палеосолёности рифейских бассейнов осадконакопления Урала по геохимическим данным (С/S метод, первые результаты) // Ежегодник-1994. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. С. 39–41.

Крупенин М.Т., Рыкус М.В., Снячев В.И., Маслов А.В. Новые данные о содержании C_{org} в сланцах нижнего и среднего рифея // Ежегодник-1992. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1993. С. 19–20.

Курбацкая Ф.А., Аблизин Е.Д. К палеогеографии терригенных толщ верхнего докембрия западного склона Среднего Урала // Ученые записки Пермского гос. ун-та. 1970. № 210. С. 109–126.

Кухаренко А.А. Литология и условия формирования ашинской серии западного склона Среднего Урала // Вопросы литологии и палеогеографии. Уч. записки ЛГУ. Сер. геол. наук. 1962. № 310. С. 245–274.

Лозин Е.В., Хасанов В.Х. Сейсмо-геологические данные о глубинном строении края платформы и Южного Урала // Геология, геофизика и полезные ископаемые Южного Урала и Приуралья. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1991. С. 48–58.

Маслов А.В. Рифейские углеродистые отложения Башкирского мегантиклинория // Литология и полез. ископаемые. 1988. № 3. С. 101–109.

Маслов А.В. Седиментационные последовательности раннего венда Урала, Норвегии и Австралии (опыт сравнительного анализа) // Палеозоны субдукции: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000а. С. 85–96.

Маслов А.В. Некоторые особенности ранневендской седиментации на Южном и Среднем Урале // Литология и полез. ископаемые. 2000б. № 6. С. 624–639.

Маслов А.В., Анфимов Л.В. Авзянская рудоносная свита среднего рифея Южного Урала (литостратиграфия, условия образования, минерализация). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000. 132 с.

Маслов А.В., Ишерская М.В. Осадочные последовательности рифея восточной и северо-восточной периферии Восточно-Европейского кратона // Российский журнал наук о Земле (электронная версия). 2002. Т. 4. № 4. <http://www.agu.org/wps/tjes>.

Маслов А.В., Оловягинищников В.Г., Ишерская М.В. Рифей восточной, северо-восточной и северной пе-

риферии Русской платформы и западной мегазоны Урала: литостратиграфия, условия формирования и типы осадочных последовательностей // Литосфера. 2002. № 2. С. 54–95.

Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерализация, геологические памятники природы). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. Том I. 351 с.

Младших С.В., Аблизин Б.Д. Стратиграфия верхнего докембрия западного склона Среднего Урала // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1967. № 2. С. 67–80.

Морозов С.Г., Иванова Т.В., Андреев Ю.В. Особенности химического состава и генезис пород верхнего протерозоя востока Русской плиты // Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород и руд. М.: Наука, 1983. С. 40.

Низамутдинов А.Г., Муслимов Р.Х., Изотов В.Г. и др. Углерод в верхнедокембрийских отложениях Татарстана. Казань: Изд-во Казанского университета, 1993. 63 с.

Романов В.А., Ишерская М.В. Рифей платформенного Башкортостана: стратиграфия, тектоника и перспективы нефтегазоносности. Уфа: Гилем, 2001. 126 с.

Ронов А.Б. Органический углерод в осадочных породах // Геохимия. 1958. № 5. С. 409–423.

Рыкус М.В., Андреев Н.И., Муркин В.П. и др. Углеродистые отложения докембрия Южного Урала. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1993. 39 с.

Семихатов М.А. Уточнение оценок изотопного возраста нижних границ верхнего рифея, венда, верхнего венда и кембрия // Дополнения к стратиграфическому кодексу России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2000. С. 95–107.

Соколов Б.С. Очерки становления венда. М.: КМК Лтд., 1998. 156 с.

Стратиграфическая схема рифейских и вендских отложений Волго-Уральской области / Е.М. Аксенов, В.И. Козлов. Объяснительная записка. Уфа: ИГ УНЦ РАН, ЦНИИГеолнеруд, БашНИПИнефть, 2000. 81 с.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Роскомнедра, ИГГ УрО РАН, 1993. 172 л.

Стратиграфический словарь: Верхний докембрий (Северная Евразия в границах бывшего СССР). М.: Наука, 1994. 351 с.

Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология / Под ред. Б.М. Келлера и П.М. Чумакова. М.: Наука, 1983. 184 с.

Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 535 с.

Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 299 с.

Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.

Тимофеев П.П. Литология – фундаменталь-

ный раздел геологической науки // Геонауки в СССР. М.: Недра, 1992. С. 125–135.

Фролов В.Т. Литология. Кн. 1. М.: МГУ, 1992. 336 с.

Холодов В.Н. О роли сероводородных бассейнов в осадочном породообразовании // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 5. С. 451–473.

Холодов В.Н., Недумов Р.И. О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 74–82.

Холодов В.Н., Пауль Р.К. Фации и генезис фосфоритов Каратау. Сообщение 1. Вендско-кембрийский палеоводоем и морфометрия фосфатных пеллет // Литология и полез. ископаемые. 1999. № 4. С. 350–367.

Чумаков Н.М. Тиллиты и тиллоиды западного склона Среднего Урала // Разрезы верхнего рифея, венда и нижнего палеозоя Среднего и Южного Урала: Путеводитель геологических экскурсий Всерос. совещания “Палеогеография венда-раннего палеозоя”. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 74–82.

Эрнст В. Геохимический анализ фаций. Л.: Недра, 1976. 127 с.

Arthur M., Jenkyns H., Brumsack H.-J., Shlanger S. Stratigraphy, geochemistry and paleoceanology of organic carbon-rich cretaceous sequences / Ginsburg R. and Beaudon B. (Eds.), Cretaceous resources, events and rhythms. Background and plans for research. NATO ASI series C. 1988. V. 304. P. 75–121.

Hatch J.R., Leventhal J.S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. // Chem. Geol. 1992. V. 99. P. 65–82.

Hild E., Brumsack H.-J. Major and minor element geochemistry of Lower Aptian sediments from NW Germany basin (core Hoheneggelsen KP40) // Cretaceous Research. 1998. V. 19. P. 625–633.

Jenkyns H. Cretaceous anoxic events: from continents to oceans // J. Geol. Soc. London. 1980. V. 137. P. 171–188.

Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.

Lewan M.D. Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 2231–2238.

Pedersen T., Calvert S. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? // AAPG Bull. 1990. V. 74. N 4. P. 454–465.

Porebska E., Sawlowicz Z. Palaeoceanographic linkage of geochemical and graptolite events across the Silurian-Devonian boundary in Bardzkie Mountains (Southwest Poland) // Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. 1997. V. 132. P. 343–354.

Precambrian sedimentary environments: a modern approach to ancient depositional systems. Special publ. N 33 of the IAS. W. Altermann and P.L. Corcoran (Eds.). Blackwell Sci. Ltd. London. 2002. 450 pp.

Quinby-Hunt M.S., Wilde P. Thermodynamic zonation in the black shale facies based on iron-manganese-vanadium content // Chem. Geol. 1994. V. 113. P. 297–317.

Rachold V., Brumsack H.-J. Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: palaeoenvironmental constraints and orbital cycles // Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. 2001. V. 174. P. 121–143.

Tyson R.V. Sedimentary organic matter. Organofacies and palinofacies. London. Chapman and Hall. 1995. 615 pp.

Tyson R.V., Pearson T.H. Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview. In: R.V. Tyson and T.H. Pearson (Eds.). Modern and ancient continental shelf anoxia. Geol. Soc. London. 1991. Spec. Publ. N 58. P. 1–24.

Wedepohl K.H. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays // In: Ahrens L.H., Press F., Runcorn S. and Urey H. (Eds.), Physics and chemistry of the Earth. 1971. V. 8. Pergamon, Oxford. P. 305–333.

Wedepohl K.H. The composition of the upper earth's crust and the nature cycles of selected metals. Metals in natural raw materials. Natural resources. In: Merian E. (Ed.), Metals and their compounds in the environment. VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, NY. 1991. P. 3–17.

Wignall P.B., Myers K.J. Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach // Geology. 1988. V. 16. P. 452–455.

Рецензенты доктор г.-м. наук Ю.О. Гаврилов, Е.В. Щенетова