

УДК 550.4:551.72.72(470.11.6)+551.217(470.11.6)

ВУЛКАНИЗМ, ВЫВЕТРИВАНИЕ И ВАРИАЦИИ ЦИКЛА ФОСФОРА В ВЕНДЕ НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

© 2004 г. С. Б. Фелицын

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
190034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2
E-mail: felitsyn@ad.iggd.ras.spb.ru*

Поступила в редакцию 01.09.2003 г.

На основе систематики микроэлементов выделены два геохимических типа вулканических пеплов в отложениях редкинского горизонта Восточно-Европейской платформы. Первый тип распространен на северо-востоке платформы и характеризуется значениями Ni/Cr и Ce/Yb, свойственными тейфре кислого состава современных извержений вулканов Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем. Второй тип имеет значения Ni/Cr и Ce/Yb, идентичные таковым в вулканах берестовецкой свиты нижнего венда. Пониженное по сравнению со стандартными пробами постархейских глинистых сланцев содержание кальция, стронция и фосфора в верхневендских пелитах Восточно-Европейской платформы указывает на континентальное химическое выветривание питающих провинций.

Вулканические пеплы повсеместно присутствуют в терригенных отложениях редкинской серии верхнего венда Московской синеклизы, Львовско-Кишиневской, Мезенской, Верхнекамской и Шкапово-Шиханской впадин [Аксенов, 1998], и объем пирокластического материала, поступившего в осадочные бассейны на Восточно-Европейской платформе в позднем венде, достигает десятков тыс. км³ [Фелицын, Сочава, 1996]. U-Pb возраст по цирконам вулканических пеплов вайзицких слоев усть-пинежской свиты верхнего венда Мезенской впадины (Зимний берег Белого моря) составляет 553.3 ± 0.3 млн. лет [Martin et al., 2000]. После установления факта широкого распространения тейфрогенных пачек в отложениях редкинской серии верхнего венда [Аксенов, Волкова, 1969] элементный состав этих вулканических пеплов стал объектом детальных исследований [Борхвардт, Фелицын, 1992; Фелицын, Сочава, 1996; Фелицын, Кириянов, 2002 и др.].

В настоящее время определяющим источником тейфры, поступающей в седиментационные бассейны, является андезит-дацит-риолитовый вулканизм на конвергентных окраинах континентов [Sharpton, Ward, 1990]. Попытки связать поздневендские тейфрогенные горизонты Подольского опорного района с эксплозивным вулканизмом субдукционных зон на юго-западе Восточно-Европейской платформы встречают определенные трудности. Начиная с 615 млн. лет назад, происходило раздвижение плит Балтика, Лаврентия и Амазония в результате рифтинга с последующим образованием эмбриональных океанов Япетус и Торнквиста в интервале 565–550 млн. лет назад [Bingen et al., 1998; Poprawa et al., 1999]. Верхневендские терригенные отложения западной окра-

ины Балтики (в современных координатах) по минеральному составу и содержанию петрогенных элементов близки к таковым из современных континентальных рифтов с преобладанием внутриплатформенных источников кластического материала [Сочава и др., 1992; McCann, 1998]. В свете этого представляется маловероятным предположение о существовании в позднем венде островодужной системы на западной окраине Восточно-Европейской платформы, поставляющей пирокластический материал в эпиплатформенные бассейны.

В то же время в Белорусской антеклизе, Волынской впадине и на Люблинском склоне Восточной Польши нижний венд представлен трапповой формацией (соответственно ратайчицкая, берестовецкая и славатицкая свиты), занимающей площадь более 200000 км² и с объемом сохранившихся в разрезе вулканических десятки тыс. км³ [Махнач, Веретенников, 1970; Воловник, 1990]. Эффузивная фация состоит в основном из оливин-гиперстен-нормативных и кварц-нормативных толеитов повышенной щелочности и щелочных базальтов [Juskowiakowa, 1971]. Подчиненное распространение имеют лавы андезит-дацитового и риолитового составов с коэффициентом эксплозивности до 85% [Воловник, 1990]. U-Pb возраст по цирконам из вулканического пепла трахиандезитового состава славатицкой свиты нижнего венда Люблинского склона Восточной Польши составляет 551 ± 4 млн. лет [Compston et al., 1995]. Проблема соотношения вулканических пеплов редкинской серии и трапповой формации волынской серии не рассматривалась, поскольку, согласно существующим корреляционным схемам [Великанов, 1985; Соколов, 1997], в

опорном Подольском разрезе тефрогенные горизонты ярышевской свиты существенно моложе берестовецких вулканитов и отделены от последних отложениями могилевской свиты.

В настоящей работе приводится систематика некоторых элементов в вендских вулканитах и тонкозернистых терригенных породах Восточно-Европейской платформы. Целью работы является определение геохимической специфики вулканических пеплов редкинского горизонта и вмещающих их тонкозернистых терригенных пород.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фактическую основу работы составляют материалы исследования вулканических пеплов и тонкозернистых терригенных пород редкинской серии из различных районов Восточно-Европейской платформы. Принципы отбора образцов, их литологическое и петрографическое описание, содержание петрогенных и малых элементов (Co, Zr, Hf, Y, Th, Rb, PЗЭ) приведены в ранее опубликованных работах [Сочава и др., 1992; Борхвардт, Фелицын, 1992; Фелицын, Сочава, 1996]. Для сравнения изучена систематика микроэлементов в базальтах берестовецкой свиты и вулканомиктовых песчаниках грушкинской свиты Львовско-Кишиневской впадины, которые образовались в результате размыва вулканитов трапшовой формации нижнего венда [Копелиович, 1965; Сочава и др., 1992]. Полученные данные сопоставлялись с составом тефры Q-R извержений Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и с составом неопротерозойских (синийских) вулканических пеплов формации Ляньто из разреза синия по берегам р. Янцзы в районе г. Ичан, пров. Хубей, Южный Китай.

Определение содержания малых, редких и рассеянных элементов проводилось с помощью нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН и в Санкт-Петербургском государственном университете на кафедре ядерной геофизики геологического факультета. Навески весом от 12 до 55 мг, помещенные в кварцевые ампулы, облучались потоком надтепловых нейтронов в течение 48 часов при плотности потока 5×10^{13} нейтр см⁻² сек⁻¹ в исследовательских каналах реактора ВВР-М Петербургского института ядерной физики РАН в г. Гатчине. Одновременно облучались стандартные образцы BCR-1, AGV-1, CG-1, CGD-1 и PЗС-3. Измерения проводились с Ge(Li) и Ge детекторами через 7 и 30 дней после активации. Средняя относительная ошибка определений составляет менее 4% для Co, Sc, La и Th, менее 7% для Sr и Yb, и менее 15% для Ni.

Содержание петрогенных элементов в осадочных породах определено химическими методами

в Опытно-методической экспедиции ПГО “Севзапгеология”, Санкт-Петербург. Определение содержания фосфора проведено в той же лаборатории фотометрическим методом, средняя относительная ошибка определений не превышает 10% при содержаниях P₂O₅ от 0.01 до 0.1% вес. и не превышает 7% при содержаниях 0.1–1.0% вес. Также использованы материалы БД PRECSED, созданного под руководством А.В. Сочавы в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН. Содержание Sr определено методом энергодисперсионного рентген-флуоресцентного анализа в Опытно-методической экспедиции ПГО “Севзапгеология”, Санкт-Петербург. Характеристическое излучение возбуждалось радионуклидным источником ¹⁰⁹Cd (22.1 keV) и регистрировалось Si(Li)-полупроводниковым детектором. Для определения содержания стронция использовалась K_α линия 14.16 keV. Средняя относительная ошибка определений в интервале концентраций 50–499 мкг/г не превышает 7% (3σ).

СИСТЕМАТИКА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ВЕНДСКИХ ВУЛКАНИТАХ

По результатам ИНАА верхневендских вулканических пеплов Восточно-Европейской платформы выделена группа элементов, содержание которых различно для образцов из различных частей платформы. Вулканические пеплы бронницких слоев ярышевской свиты Львовско-Кишиневской впадины содержат значительно меньше хрома по сравнению с тефрой из разреза юго-восточного Беломорья – 6.9 ± 2.4 и 31.5 ± 17.6 мкг/г ($x \pm 1\sigma$), соответственно. Среднее содержание никеля в вулканических пеплах из юго-западной и северо-восточной частей платформы практически одинаково (~15 мкг/г), что определяет значимые отличия величины Ni/Cr в двух выборках: 2.2 ± 0.84 в бронницких пеплах Подольского разреза и 0.52 ± 0.16 в пеплах лямияцких, верховских и вайзицких слоев (соответствуют вулканогенно-осадочным горизонтам I, II и III по Е.М. Аксенову и С.А. Волковой [1969]) Беломорского разреза. Минимальные содержания Ni и Cr обнаружены в пепловых прослоях мощностью 1–2 мм из нижней части усть-пинежской свиты скв. Красавино-2 (горизонт I по [Аксенов, Волкова, 1969]), при этом величина отношения Ni/Cr в этих пеплах составляет 2.0–3.5 (табл. 1).

Имеет место корреляция между степенью фракционированности PЗЭ и величиной отношения Ni/Cr: бронницкие пеплы Подолии характеризуются высокими значениями Ce/Yb_{CN} 8.4 ± 0.75 (CN – хондрит-нормированные значения: 0.957 мкг/г для церия и 0.248 мкг/г для иттербия, по [Evensen et al., 1978]), тогда как для вулканических пеплов усть-пинежской свиты Беломорского разреза среднее значение Ce/Yb_{CN} равно 3.3 ±

Таблица 1. Содержание Ni, Cr и величина Ce/Yb (хондрит-нормированные значения) в позднедокембрийских вулканитах Восточно-Европейской платформы и в тефре современных островодужных вулканов

Номер образца	Глубина, м	Ni, мкг/г	Cr, мкг/г	Ce/Yb _{CN}	Ni/Cr
Базальты берестовецкой свиты волынской серии Овадно-Ратновского поля, скв. Ратно-1, Волынская обл., Украина					
БОРП-1	541	42	31	8.0	1.4
БОРП-2	530	34	25	6.7	1.4
Песчаники грушкинской свиты волынской серии Львовско-Кишиневской впадины, скв. 3628, с. Денисовка, Хмельницкая обл., Украина					
701-22	415	50	31	6.1	1.7
701-25	399	76	40	6.0	1.9
Вулканические пеплы бронницких слоев ярышевской свиты валдайской серии Львовско-Кишиневской впадины скв. 3643, с. Чухели, Хмельницкая обл., Украина					
700-76	384	57	56	7.8	1.0
скв. 60, г. Рыбница, Молдова					
735-67	561	11	9	9.6	1.2
735-66	563	23	8	7.8	2.8
735-63	569	11	9	9.6	1.2
735-60	573	13	7	8.0	1.9
735-58	576	12	4	8.8	3.0
Обнажение у с. Борщев Яр, Винницкая обл., Украина					
710-17А	–	10	3	7.8	3.4
710-17Б	–	18	8	7.8	2.3
Вулканические пеплы горизонта I усть-пинежской свиты, скв. Красавино-2, северо-восточная часть Московской синеклизы, 15 км к северу от г. Великий Устюг					
939-56А	2237	7	2	7.1	3.5
939-56Б	2237.2	8	4	6.7	2.0
Вулканические пеплы лямичских (I-й горизонт), верховских (II-й горизонт) и вайзицких (III-й горизонт) слоев усть-пинежской свиты, скв. Тучкино-1, Мезенская впадина, Онежский п-ов					
1000-189 (III-й горизонт)	645	28	35	3.6	0.80
1000-193 (III-й горизонт)	653	20	40	4.4	0.50
1000-194 (III-й горизонт)	654	30	80	1.7	0.38
1000-200 (II-й горизонт)	693	4	7	3.1	0.57
1000-200а (II-й горизонт)	694	8	15	3.6	0.53
1000-201 (II-й горизонт)	695	20	30	3.6	0.67
1000-233 (I-й горизонт)	908	7	15	3.6	0.47
1000-240 (I-й горизонт)	915	9	30	3.1	0.30
Вулканические пеплы формации Ляньто, основание синийской системы в районе г. Ичан, пров. Хубей, Южный Китай					
КЯ-10	–	12	25	5.7	0.50
КЯ-5	–	6	10	2.7	0.60
КЯ-9	–	5	12	4.1	0.42
КЯ-7	–	9	40	3.4	0.21
КЯ-8	–	2	15	2.9	0.13
КЯ-2	–	4	15	4.4	0.27
Средние значения для 69 образцов Q-R вулканических пеплов (андезиты, дациты и риолиты) Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем					
		6.7 ± 3.8	17.8 ± 8.4	3.4 ± 0.97	0.41 ± 0.20

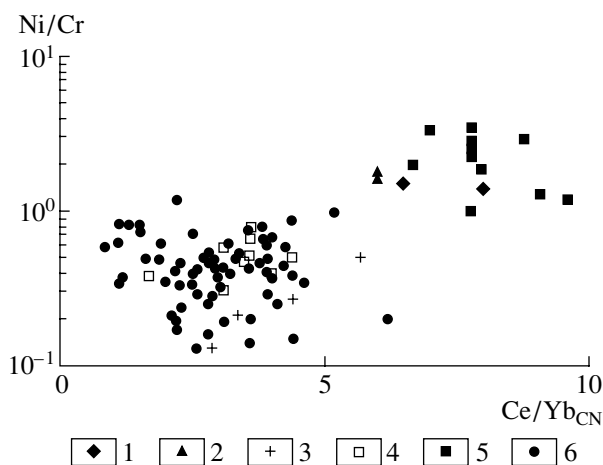


Рис. 1. Положение составов различных вулканитов на диаграмме Ni/Cr–Ce/Yb_{CN}.

1 – базальты берестовецкой свиты нижнего венда; 2 – вулканомиктовые песчаники грушкинской свиты нижнего венда; 3 – вулканические пеплы формации Ляньто, основание синийской системы; 4 – вулканические пеплы лямницких, верховских и вайзицких слоев усть-пинежской свиты верхнего венда юго-восточного Беломорья (горизонты I, II и III); 5 – вулканические пеплы бронницких слоев ярьшевской свиты верхнего венда Подолии и горизонта I усть-пинежской свиты скв. Красавино-2; 6 – тефра андезит-риолитового состава четвертичных и современных извержений вулканов Алеутской дуги (Спурр, Ридаут, Августин, Катмаи (Новарупта), Павлов, Фишер) и Курило-Камчатской дуги (Безьянный, Шивелуч, Опала, Хангар, Эбеко, Ксудач, Карымский, Авачинский, Алаид и Горелый) по результатам настоящей работы и данным из опубликованных ранее работ [Фелицын и др., 1990; Мелекесцев и др., 1991; Кирьянов, Фелицын, 2000].

0.77. Содержания и спектры распределения РЗЭ в верхневендских пеплах Восточно-Европейской платформы приведены в работе Д.В. Борхвардта и С.Б. Фелицына [1992].

На графике Ni/Cr–Ce/Yb_{CN} достаточно определенно выделяются два поля фигуративных точек. Вулканические пеплы усть-пинежской свиты Беломорского разреза находятся в поле составов тефры от андезитового до риолитового составов Q–R извержений вулканов Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем. Содержание Ni в последних варьирует от 1 до 21, Cr – от 2 до 66 мкг/г, Ni/Cr = 0.41, Ce/Yb_{CN} = 3.4, что соответствует аналогичным отношениям для вулканитов современных островных дуг [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. В этом же поле находятся составы вулканических пеплов формации Ляньто из нижней части разреза синийской системы в Южном Китае (рис. 1). Верхневендские вулканические пеплы бронницких слоев Подолии с повышенными значениями отношения Ce/Yb_{CN} и величиной отношения Ni/Cr > 1.0 на графике Ni/Cr–Ce/Yb_{CN} расположены вместе с составами базальтов жер-

ловой фации берестовецкой свиты Овадно-Ратновского вулканического поля, вулканомиктовыми песчаниками грушкинской свиты нижнего венда и вулканическими пеплами горизонта I усть-пинежской свиты скв. Красавино-2. Распределение микроэлементов в вулканитах венда Восточно-Европейской платформы свидетельствует о наличии двух геохимических типов вулканических пеплов в разрезе. Первая группа характеризуется повышенными значениями отношений Ce/Yb_{CN} и Ni/Cr, представлена бронницкими пеплами в Подольском разрезе и горизонтом I на севере Московской синеклизы и по перечисленным показателям аналогична базальтам берестовецкой свиты и вулканомиктовым песчаникам грушкинской свиты нижнего венда. Вторая группа включает в себя вулканические пеплы лямницких, верховских и вайзицких слоев усть-пинежской свиты верхнего венда юго-восточного Беломорья. Эти пеплы по величине Ni/Cr и Ce/Yb_{CN} отношений тождественны пеплам формации Ляньто из основания синийской системы Южного Китая и тефре андезит-риолитового состава современных островных дуг Камчатского типа. Отложенные пепловые горизонты формации Ляньто Южно-Китайской платформы определенно связано с островодужными комплексами Баньси и Жебао [Yang et al., 1999].

Начиная с расстояния 75–100 км от центра извержения, вулканическое стекло становится определяющим компонентом кислой тефры в результате эоловой гравитационной дифференциации [Кирьянов, 1983; Фелицын, Кирьянов, 1987], поэтому приведенные в таблице значения Ni/Cr и Ce/Yb_{CN} в верхневендской тефре характеризуют состав вулканического стекла первично андезитового и дацитового составов [Борхвардт, Фелицын, 1992; Фелицын, Кирьянов, 2002]. Витрокластическая природа пеплового материала бронницких слоев Подольского разреза ранее установлена петрографическими методами [Копельювич, 1965]. Рассеянная форма нахождения петрогенных, малых и редких элементов (включая РЗЭ, Ni и Cr) в пепловых частицах дистальной тефры [Фелицын и др., 1990] определяет отсутствие изменчивости отношений Ce/Yb_{CN} и Ni/Cr при эоловой гравитационной дифференциации тефры.

Пепловые частицы размером менее 50 мкм составляют более 60% вес. от общего количества пеплового материала эксплозий плинианского типа [Brazier et al., 1983], что предполагает интенсивный гальмиролиз вулканического пепла и изменение его первичного состава с момента осаждения в морские бассейны. Тем не менее относительная обедненность хромом вулканитов венда Подольского разреза не может быть объяснена миграцией Cr при прохождении пепловыми частицами колонны воды, так как хром не обогаща-

ет водорастворимую часть пеплового материала относительно содержаний в твердой фазе [Меняйлов и др., 1980], при этом растворимость соединений наиболее распространенных форм Cr^{3+} и Cr^{6+} минимальна в широком диапазоне значений рН [Bartlett, Kimble, 1976]. Величина отношения Ni/Cr в бронницких вулканических пеплах не зависит от того, какой материал (кверный или из естественных обнажений) использовался для анализа, поэтому роль гипергенных процессов при возможном изменении содержаний и соотношения никеля и хрома в изученных вулканиках представляется также весьма незначительной. Согласно ранее опубликованным данным, содержания Ni и Cr в базальтах эффузивной фации нижнего венда Брестской впадины составляют 54 и 50 мкг/г, соответственно, в туфах андезит-дацитового состава – 16 и 7 мкг/г по десяткам единичных определений [Махнач, Веретенников, 1970], т.е. величина отношения Ni/Cr больше 1.0.

Отсутствие фракционирования РЗЭ при диагенезе и в зоне гипергенеза обоснована значительным количеством натуральных наблюдений [Fleet, 1984; Тейлор, Мак-Леннан, 1988].

В свете вышеизложенного, обогащение никелем относительно хрома различных фациальных разностей трапповой формации Волино-Подольи, а также повышенные значения отношения $\text{Ce}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ следует рассматривать в качестве первичной геохимической характеристики ранневендского магматизма на юго-западе Восточно-Европейской платформы.

ВЕНДСКИЙ МАГМАТИЗМ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И СОСТАВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВ

Вулканические пеплы усть-пинезской свиты Беломорского разреза связаны с позднедокембрийским вулканизмом Тимано-Печорского бассейна, на что указывают данные по распределению мощности пепловых горизонтов по площади и вариации их минерального и элементного составов [Аксенов, 1967; Аксенов, Волкова, 1969]. Габбро-монцитонитовые и габбро-сиенит-гранитные комплексы п-ова Канин и Северного Тимана с возрастом 535–600 млн. лет [Костюхин, Степаненко, 1987] трассируют зону палеосубдукции на границе Ижма-Печорского и Денисовско-Хорейверского мегаблоков [Белякова, Степаненко, 1991; Костюченко, 1994]. Эксплозивный вулканизм, связанный с островодужной системой на северо-восточной периферии Восточно-Европейской платформы, поставлял пепловый материал с “островодужными” значениями $\text{Ce}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ и Ni/Cr в бассейны осадконакопления на севере Московской синеклизы, в том числе в юго-восточное Беломорье. Как видно на рис. 1, фигуративные точки составов вулканического пепла Беломорского

разреза полностью перекрываются полем составов тефры современных извержений вулканов Алеутской и Курило-Камчатской островных дуг.

Примечательна изменчивость состава пеплового горизонта I из нижней части усть-пинезской свиты на северо-востоке Восточно-Европейской платформы: вулканические пеплы лямичских слоев имеют типично островодужные значения отношений $\text{Ce}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ и Ni/Cr , тогда как в скв. Красавино-2, расположенной в 600 км на юго-восток от Белого моря, в составе вулканических пеплов горизонта I обнаружены значения $\text{Ce}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ и Ni/Cr , характерные для вендских вулкаников юго-запада Восточно-Европейской платформы (см. табл. 1).

Вулканические пеплы из нижней части усть-пинезской свиты скв. Красавино-2 (обр. №№ 939-56А и 939-56Б) представляют собой прослой мощностью 1 и 2 мм белого цвета, состоящие практически полностью из смектита. На основе анализа изменчивости мощности прослоев пеплов в разрезах усть-пинезской свиты Московской синеклизы, Е.М. Аксенов и С.А. Волкова [1969] предположили, что пепловый материал поступал с юго-запада платформы при формировании пеплового горизонта I в северных и северо-восточных районах Восточно-Европейской платформы.

Изучение пеплопадов современных извержений показывает возможность возникновения слоев вулканического пепла мощностью несколько мм на расстоянии в тысячи километров от центра извержения даже в случае весьма незначительных объемов эксплозивного материала. При извержении вулкана Гекла (Исландия) 29 марта 1947 г. с объемом андезитовой тефры 0.21 км³ площадь пеплопада составила 280000 км², и на расстоянии 3800 км по траектории движения пепловой тучи в Южной Финляндии выпал слой пепла толщиной 2–3 мм, состоящий полностью из вулканического стекла [Thorarinsson, 1954]. Поэтому предположение о нахождении области активного эксплозивного вулканизма на юго-западном обрамлении Восточно-Европейской платформы (удаленной примерно на 2000 км от Мезенской впадины) при образовании горизонтов пеплов мощностью 1–5 мм усть-пинезской свиты на севере и северо-востоке платформы не противоречит данным наблюдений над пеплопадами современных извержений. Среди десятков прослоев вулканического пепла в пелитах горизонта I северной части Московской синеклизы вполне может присутствовать пепловый материал из двух источников: из питающей вулканической провинции на юго-западе Восточно-Европейской платформы и из зоны островодужного вулканизма в Тимано-Печорской области.

Детальное изучение трапповой формации Львовско-Кишиневской и Брестской впадин [Махнач, Веретенников, 1970; Воловник, 1990;

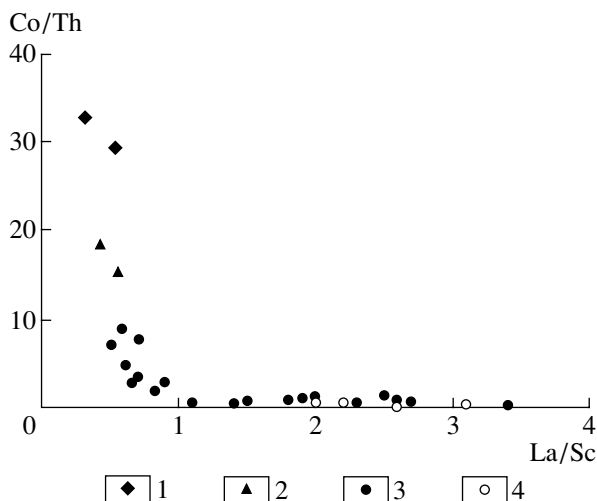


Рис. 2. Положение составов вулканогенных и осадочных пород венда Восточно-Европейской платформы на диаграмме Co/Th–La/Sc.

1 – базальты берестовецкой свиты нижнего венда; 2 – вулканомиктовые песчаники грушкинской свиты нижнего венда; 3 – тонкозернистые терригенные отложения ярышевской и нагорянской свит верхнего венда Подольского опорного района; 4 – тонкозернистые терригенные отложения из нижних частей базальных гдовской (скв. Костово-13, 50 км северо-восточнее г. Санкт-Петербург, глубина 450–454 м) и плетеновской (скв. Гаврилов-Ям № 2, 50 км южнее г. Ярославль, глубина 2580–2588 м) свит верхнего венда.

Коренчук, 1993] позволило установить многочисленные вулканические аппараты центрального типа в пределах Овадно-Ратновской, Ратно-Хотешовской, Ровенской и Гороховской зон. Несмотря на то, что площадь распространения более молодых отложений редкинской серии в Днестровском перикратоне сходна со структурным планом волинского времени [Великанов, 1985], нет оснований полагать прекращение вулканической активности, связанной с формированием покровов базальтов на юго-западе Восточно-Европейской платформы, непосредственно с начала редкинского времени. Присутствие тефрового материала в средней части калюсских слоев нагорянской свиты, т.е. нижней части котлинского горизонта по современным стратиграфическим схемам [Асеева, 1993; Соколов, 1997] установлено на основании минералогических [Копелиович, 1965] и геохимических данных [Фелицын, Сочава, 1996].

Центры извержений могли располагаться в континентальных областях, незатронутых редкинской трансгрессией и сложенных вулканитами трапповой формации по окраинам поздневендского бассейна осадконакопления Волино-Подольи, например, северо-восточнее линии Ровно-Кобрин. Миграция центров вулканической активности в течение раннего венда с юга на север [Зиновенко, 1976; Гарецкий, Зиновенко, 1994] до-

пускает существование действующих вулканов севернее Львовско-Кишиневской впадины – в районах Мазурского выступа и Подляско-Брестской впадины.

На графике Co/Th – La/Sc (рис. 2) приведены результаты анализа тонкозернистых терригенных пород ярышевской и нагорянской свит Подольского опорного разреза юго-запада Восточно-Европейской платформы. Расположение фигуративных точек в форме гиперболы согласуется с моделью простого двухкомпонентного смешения; конечными членами в рамках двухкомпонентной модели смешения при образовании верхневендских аргиллитов Подолии являются базальты берестовецкой свиты (Co/Th \approx 35, La/Sc \approx 0.30) и породы кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы (Co/Th \approx 0.45, La/Sc \approx 3.4). В тонкозернистых терригенных отложениях из нижних частей базальных гдовской (северо-западная часть Московской синеклизы) и плетеновской (центральная часть Московской синеклизы) свит верхнего венда величина Co/Th составляет 0.45–0.71, La/Sc – от 2.0 до 3.1. Внутриплатформенные источники кластического материала были определяющими при образовании нижней части разреза верхнего венда в перечисленных районах [Сочава и др., 1992]. Поэтому значения отношений Co/Th до 9.0 и La/Sc до 0.6 в тонкозернистых терригенных отложениях свидетельствуют о наличии вулканитов основного состава в областях сноса при формировании аргиллитов свит верхней части редкинского и низов котлинского горизонтов. Правомерность использования отношений Co/Th и La/Sc для проверки справедливости двухкомпонентной модели смешения при образовании тонкозернистых терригенных отложений даже для высокометаморфизованных комплексов показана в работе С.М. Мак-Леннана и С.Р. Тейлора [1987].

Естественно предположить генетическую связь между вулканическими пеплами с повышенными значениями отношений Ni/Cr и Ce/Yb на юго-западе Восточно-Европейской платформы и вулканитами трапповой формации с аналогичными геохимическими характеристиками. Такое предположение не противоречит приведенным в настоящей работе данным по элементному составу вендских вулканитов, распределению вулканических пеплов по разрезу редкинских отложений и литофациальным реконструкциям осадконакопления в раннем и позднем венде Подольского опорного района.

Базальты с высокими значениями Ce/Yb типичны для трапповых провинций [Lightfoot et al., 1990]. Образование подобных базальтов связано с частичным плавлением мантийного перидотита в области устойчивости граната [Wooden et al., 1993], что обуславливает высокие значения Ce/Yb

в образующихся магмах. Важнейшей особенностью магматической эволюции континентальных оливиновых толеитов и пикритов (которые рассматриваются в качестве родоначальных магм трапповых комплексов) является кристаллизационное фракционирование в промежуточных камерах и, согласно данным экспериментальной петрологии, фракционирование оливин-толеитовой магмы при давлении 12–20 кбар (на глубинах 35–70 км) осуществляется в условиях ограниченного поля кристаллизации пироксенов [Уилли, 1983]. Соответственно, производные расплавы обогащаются никелем и обедняются хромом: $K_p Ni$ между оливином и расплавом значительно выше, чем между пироксеном и расплавом, тогда как для хрома имеет место противоположная тенденция [Rollinson, 1993]. Очевидно, что более глубинное (70–100 км) эклогитовое фракционирование пикритовой магмы также может дать производные базальтовые магмы с высокими значениями отношений Ce/Yb и Ni/Cr .

По данным С.Б. Фелицына (неопубликованные данные), значения ϵ_{Nd} (550 млн. лет) составляют +4.8 ($^{147}Sm/^{144}Nd = 0.12144$, $^{143}Nd/^{144}Nd_{изм} = 0.512614 \pm 9$, $Sm = 8.4$, $Nd = 41.7$ мкг/г) для базальтов нижнего венда Брестской впадины (скв. Кобрин, глубина 231 м) и +3.5 ($^{147}Sm/^{144}Nd = 0.12557$, $^{143}Nd/^{144}Nd_{изм} = 0.512559 \pm 14$, $Sm = 10.2$, $Nd = 49.3$ мкг/г) для базальтов Овадно-Ратновского вулканического поля, скв. Ратно, глубина 541 м. Подобные значения $\epsilon_{Nd}[t]$ достаточно типичны для трапповых провинций и указывают на незначительную деплетированность мантийного источника при практически отсутствующей контаминации коровым материалом в промежуточных магматических камерах.

Последующая дифференциация вплоть до образования андезитовых и дацитовых расплавов осуществляется при ведущей роли пироксенов и амфиболов, что с учетом величины K_p между перечисленными расплавами и минеральными фазами [Rollinson, 1993] приводит к увеличению значений Ce/Yb и Ni/Cr в конечных дифференциатах. Унаследованность кислыми расплавами геохимических особенностей родоначальных магм надежно установлена при изучении элементного состава вулканических щелочных серий Курило-Камчатской дуги [Пополитов, Волюнец, 1981].

СВИДЕТЕЛЬСТВА ХИМИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОРОД В РАЗРЕЗЕ ВЕНДА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Верхневендские тонкозернистые терригенные породы Восточно-Европейской платформы характеризуются исключительно низкими содержаниями кальция и CO_2 [Ронов и др., 1990; Сочава

и др., 1992]. Причина подобной геохимической аномальности вендских отложений не вполне понятна. Во время формирования фосфоритонесной нагорьянской свиты Подолии источником кластического материала являлись коры выветривания восточной части Украинского щита; корообразование происходило в условиях тропического гумидного климата с температурами $\sim 25^\circ C$ и $pH \sim 5.5$ [Коренчук, 1993]. Минеральный состав аргиллитов калюских слоев нагорьянской свиты – присутствие каолинита до 20% вес. даже во фракции менее 0.6 мкм [Мельников и др., 1990] – также свидетельствует в пользу интенсивного химического выветривания в условиях теплого и влажного климата, пепеленизации суши и медленного осадконакопления. Непереотложенные каолиновые коры выветривания и продукты их размыва обнаружены в верхней части мезенской свиты юго-восточного Беломорья и в кровле непейцинской свиты центральной части Московской синеклизы [Борхвардт, Фелицын, 1992]; т.е. на тех стратиграфических уровнях, где встречаются фосфоритонесные горизонты верхнего венда [Фелицын, 2002б]. Изучение распределения по разрезу геохимических индикаторов степени зрелости глинистого материала ($Na/(Na + K)$, Ti/Al , Mg/Al) показало, что наибольшей зрелостью характеризуется глинистое вещество верхней части редкинского и нижней части котлинского горизонтов; источником кластического материала являлись Балтийский и Украинский щиты, а также Воронежский и Волго-Камский массивы [Сачава и др., 1992; Аксенов, 1998].

Проведенное в рамках настоящей работы исследование распределения кальция, стронция и фосфора в стратиграфических подразделениях верхнего венда–нижнего кембрия Восточно-Европейской платформы полностью подтверждает представление об интенсивном химическом выветривании питающих провинций начиная с нагорьянского времени. На фоне пониженных содержаний перечисленных элементов в вендских аргиллитах по сравнению с композитными пробами постаршейского глинистого сланца (РААС) и глинистого сланца Восточно-Европейской платформы (RPSC) тонкозернистые отложения верхней части редкинского горизонта и вышележащие отложения котлинского горизонта содержат экстремально низкие концентрации кальция, стронция и фосфора (табл. 2). Расчетное количество CO_2 , необходимое для преобразования пород Украинского и Балтийского кратонов в глинистые сланцы фосфоритонесной нагорьянской свиты и ее стратиграфических аналогов в других частях платформы составляет 2.0–2.5 ммоль/г [Фелицын, 2002б], что значительно превосходит расход CO_2 при образовании позднепротерозойских и фанерозойских аргиллитов Восточно-Европейской платформы – 1.6 и 1.3 ммоль/г [Холленд, 1989]. Подвиж-

Таблица 2. Содержание Ca, Sr и P в аргиллитах верхнего венда–нижнего кембрия Восточно-Европейской платформы и в композитных пробах глинистых сланцев

Элемент	Редкинский горизонт	Фосфоритоносный уровень в кровле редкинского и в основании котлинского горизонтов	Котлинский горизонт	Лонтоваский горизонт нижнего кембрия	РААС по [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]	RPSC по [Мигдисов и др., 1994]
Ca, % вес.	0.46 (525)	0.26 (28)	0.26 (539)	0.33 (156)	0.94	4.4
Sr, мкг/г	128 (439)	70 (88)	79 (514)	93 (132)	200	–
P, мкг/г	410 (591)	230 (156)	280 (761)	330 (185)	700	490

Примечание. В скобках – количество определений.

ность кальция и стронция при континентальном выветривании максимальна по сравнению с другими щелочноземельными элементами, обеднение ими остаточных продуктов выветривания определяется разрушением плагиоклазов и K-полевых шпатов уже на ранних стадиях выветривания [Nesbitt et al., 1980]. Таким образом, обеднение щелочно-земельными элементами (в 2–3 раза по сравнению с бескарбонатным глинистым веществом постархейского композитного сланца РААС и в 10–15 раз по сравнению с генеральной пробой глинистых сланцев Восточно-Европейской платформы) аргиллитов котлинского горизонта скорее всего связано с интенсивным химическим выветриванием. Пониженные содержания фосфора в глинистом веществе также свидетельствуют о химическом выветривании в условиях кислой среды. В магматических и осадочных породах фосфор содержится главным образом в составе минералов группы апатита, устойчивость которых при выветривании определяется величиной рН метеорных вод, количеством осадков и температурой [Маккелви, 1977]. При рН менее 4.0 гидроксилапатит не является устойчивой фазой; в интервале рН от 5.0 до 6.0 растворимость фосфатов кальция на 1–2 порядка выше, чем в интервале рН от 7.0 до 8.0 [Браун, 1977]. Влияние характера выветривания (аридного или гумидного) на подвижность фосфора при выветривании вулканитов основного состава было показано ранее [Фелицын, 2002а]. Сходство в распределении по разрезу от рифея до кембрия содержаний кальция и фосфора в глинистых породах Восточно-Европейской платформы в сочетании с их минимумом в венде [Ронов и др., 1990; Фелицын, 2002б] подтверждает предположение о значительной роли фосфата кальция в качестве источника Ca и P в терригенных отложениях.

Использование данных по современным процессам континентального химического выветривания для объяснения кислотного выветривания в докембрии представляет определенную сложность, поскольку в настоящее время главным источником органических кислот являются продукты распада высших растений. Отсутствие подоб-

ных растений в областях сноса определило многие особенности седиментогенеза в додевонское время [Сочава и др., 1994], тем не менее наличие додевонских каолиновых кор выветривания явно свидетельствует о кислотном выветривании до появления диверсифицированной наземной растительности.

Установление связи пепловых слоев с трапповым вулканизмом на юго-западной (в современных координатах) окраине Восточно-Европейской платформы позволяет предположить поступление значительного количества кислотообразующих веществ до вулканогенного происхождения в области сноса до нагорянского времени включительно. Диоксид серы является вторым после CO₂ компонентом сухого вулканического газа, и оценка вулканического источника SO₂ составляет ~15 × 10¹² г/год [Lambert et al., 1988]. При этом единичные извержения могут поставлять в атмосферу количество диоксида серы, превышающее ее поступление за счет деятельности всех остальных вулканов Земли за год: в ходе извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. эмиссия SO₂ составила 17 × 10¹² г [Kerpler, 1999]. В ходе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. выброс кислотообразующих веществ составил ~1 × 10¹² г за 2.5 месяца и величина рН атмосферных осадков вблизи конусов Северного прорыва составляла 2.0–4.1, в районе извержения на Южном прорыве выпадали осадки с рН = 3.1 [Меняйлов и др., 1980]. Расчеты кислотности атмосферных осадков при антропогенном выбросе SO₂ показали, что в случае концентрации SO₂ 50 мкг/м³ (вполне реальная величина для областей современного активного вулканизма) над площадным источником и скорости переноса 20 км/час, величина рН дождевых осадков на расстоянии 600 км от источника составляет 3.8, основной вклад в закисление осадков составляет собственно серная кислота [Израэль и др., 1989]. Вполне очевидно, что выпадение осадков с такой величиной рН приведет к выщелачиванию щелочно-земельных элементов и фосфора при химическом разложении плагиоклазов и апатита.

В атмосфере диоксид серы окисляется до H₂SO₄, время существования которой для совре-

менных климатических условий умеренного пояса составляет около 50 часов, главным нейтрализующим агентом является аммиак биохимического происхождения [Израэль и др., 1989]. Поскольку в настоящее время на континентах определяющим источником органического вещества и продуктов его деградации в почвенном слое являются сосудистые растения [Кодина, Галимов, 1984], можно предполагать большее время существования кислот вулканического происхождения в вендской атмосфере по причине несомненного отсутствия высших растений в венде. В свете этого влияние вулканических кислот на геохимию континентального выветривания в додевонское время могло быть более значительным по сравнению с последующим временем, когда источником нейтрализующих агентов стала биодеградация органического вещества.

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА КАК ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ РАСТВОРИМЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА В ПОЗДНЕВЕНДСКИЕ БАССЕЙНЫ

Объем верхневендских терригенных отложений Восточно-Европейской платформы составляет около 1.0 млн. км³ [Ронов и др., 1990; Аксенов, 1998] при среднем содержании в них фосфора 300 мкг/г [Фелицын, 2002б и настоящая работа]. Дефицит фосфора в осадочном чехле верхнего венда относительно его содержания в стандартных композитных пробах глинистых сланцев составляет от 5×10^{17} до 10.5×10^{17} г. Приведенная величина превосходит содержание фосфора в разведанных запасах микрозернистых фосфоритов венд-кембрийской эпохи фосфогенеза $\sim 4.0 \times 10^{15}$ г [Яншин, Жарков, 1986]. Поскольку глинистые отложения верхнего венда Восточно-Европейской платформы несут следы кислотного выветривания, естественно предположить увеличение доли растворимых соединений фосфора в общем потоке фосфора, поступившего с Восточно-Европейской платформы в верхнем венде, т.е. за 7–10 млн. лет. Количество ортофосфатов в современных реках различных климатических поясов составляет от 9 до 12 мкг/л при максимальной скорости стока растворимых фосфатов до 10×10^3 г км⁻² год⁻¹ в реках влажного тропического пояса, что на 1.0–1.5 порядка превышает скорость стока фосфора с субарктическими реками [Meуbeck, 1982].

Приуроченность эпох фосфогенеза к периодам увеличения химического выветривания на континентах отмечалась давно [Занин, 1984; Холодов, Пауль, 1993 и др.], при этом фосфатообразование и выветривание происходили геологически одновременно по причине незначительного времени пребывания фосфора в современных океанах: $\sim 10^4$ лет по [Ruttenberg, 1993]. Позднее

было установлено увеличение скорости захоронения фосфора с биогенными и терригенными осадками (включая глубоководные) в эпохи потепления и интенсивного континентального выветривания для последних 160 млн. лет [Fölmí, 1995]. Полученные в рамках настоящей работы результаты свидетельствуют о влиянии условий континентального выветривания на цикл фосфора и в позднем докембрии.

Начиная с конца редкинского и на протяжении большей части котлинского времени, роль внешних источников кластического материала была заметной при формировании верхневендского осадочного чехла Восточно-Европейской платформы [Сочава и др., 1992], поэтому в бассейны осадконакопления вполне мог поступать выветрелый материал не только с выступов фундамента платформы, но и с ее складчатого обрамления [Беккер, 1988]. Эпиплатформенные бассейны Восточно-Европейской платформы котлинского времени были значительно опресненными, что установлено на основании литолого-минералогических индикаторов в отложениях Подольского опорного района [Асеева, 1993], в центральной [Афанасьева и др., 1995] и северо-западной [Пиррус, 1989] частях Московской синеклизы. Осаждение фосфатов и карбонатов в подобных бассейнах маловероятно, и мобилизованные при выветривании элементы в форме растворимых соединений должны были поступать в морские бассейны, окружавшие плиту Балтика. В соответствии с палеонтологическими [Gubanov, 2002] и изотопно-геохимическими [Felitsyn, Gubanov, 2002] данными, морские бассейны, разделяющие фрагменты Родинии, представляли собой в позднем докембрии и раннем кембрии скорее относительно узкие проливы, нежели обширные океанические пространства. Увеличение потока фосфора, мобилизованного при химическом выветривании на Восточно-Европейской платформе в позднем венде, должно было существенно повлиять на геохимию указанных бассейнов с последующим увеличением биопродуктивности литоральных зон и фосфогенезом. Вариации цикла фосфора вблизи границы докембрий–кембрий предполагались давно [Brasier, 1992 и др.], причины подобных вариаций традиционно связывались с океаническим резервуаром фосфора – перемешиванием вод стратифицированного океана [Cook, Shergold, 1984], появлением динамического апвеллинга и т.п. [Батурина, 1999 и др.]. Установление факта обеднения фосфором вендского осадочного чехла Восточно-Европейской платформы позволяет считать континентальное химическое выветривание возможной причиной изменений цикла фосфора в позднем докембрии, а вендский континент Балтика рассматривать в качестве важного источника фосфора, поступавшего в позднекембрийские бассейны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установление связи эксплозивного вулканизма, поставившего значительное количество пирокластического материала в верхневендские бассейны осадконакопления на Восточно-Европейской платформе, с трапповым вулканизмом на юго-западе (в современных координатах) платформы объясняет присутствие вулканического пепла в разрезах Подольского опорного района в соответствии с геодинамикой региона в позднем докембрии. В основном объеме тефры трех вулканогенно-осадочных горизонтов усть-пинезской свиты на северо-востоке платформы значения отношений Ni/Cr и Ce/Yb_{CN} аналогичны значениям в кислой тефре вулканов современных островных дуг Камчатского типа. Наиболее вероятно связь этих вулканических пеплов с процессами субдукции на северо-восточной окраине Восточно-Европейской платформы в конце докембрия. Роль траппового вулканизма в качестве источника пирокластического материала, очевидно, была определяющей – вулканические пеплы с геохимической спецификой, свойственной базальтам берестовецкой свиты, присутствуют в разрезах верхнего венда на северо-востоке (в современных координатах) платформы.

Допущение одновременного существования активных вулканических зон на юго-западе и северо-востоке (в современных координатах) Восточно-Европейской платформы вплоть до начала котлинского времени позволяет связать резко выраженную обедненность тонкозернистых терригенных отложений наиболее подвижными в условиях кислотного выветривания элементами (кальцием, стронцием и фосфором) воздействием кислотообразующих веществ вулканического происхождения.

Автор благодарен А.А. Кольцову и Т.Г. Пшеничновой за аналитические определения и В.В. Иваникову за полезные замечания и консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 03-05-64062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева М.С., Бурзин М.Б., Михайлова М.В., Кузьменко Ю.Т. Условия образования потенциально нефтематеринских пород // Геология нефти и газа. 1995. № 4. С. 42–48.
- Батурин Г.Н. Гипотезы фосфогенеза и океанская среда // Литология и полез. ископаемые. 1999. № 5. С. 451–472.
- Беккер Ю.Р. Молассы докембрия. Л.: Недра, 1988. 288 с.
- Белякова Л.Т., Степаненко В.Н. Магматизм и геодинамика байкалитид фундамента Печорской синеклизы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 106–117.
- Борхвардт Д.В., Фелицын С.Б. Геохимия вулканических туфов редкинского горизонта верхнего венда Русской платформы // Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 33–45.
- Браун У.И. Растворимость фосфатов и других умеренно растворимых соединений // Фосфор в окружающей среде. М.: Мир, 1977. С. 232–272.
- Великанов В.А. Опорный разрез венда Подолии // Вендская система. Стратиграфия и геологические процессы. М.: Наука, 1985. С. 35–67.
- Воловник Б.Я. Терригенно-вулканогенная формация. Нижний венд // Геотектоника Вольно-Подолии. Киев: Наукова думка, 1990. С. 76–84.
- Гарецкий Р.Г., Зиновенко Г.В. Вендский вулканизм запада Восточно-Европейской платформы // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М.: Гео-инвекс, 1994. С. 176–182.
- Занин Ю.Н. Вопросы эволюции фосфоритообразования в истории Земли // Эволюция осадочного рудообразования в истории Земли. М.: Наука, 1984. С. 79–86.
- Зиновенко Г.В. Основные закономерности размещения вулканогенно-осадочных толщ на территории Подляско-Брестской впадины // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1976. № 3. С. 61–66.
- Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., и др. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 269 с.
- Кирьянов В.Ю. Гравитационная эоловая дифференциация пеплов вулкана Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1983. № 6. С. 30–39.
- Кирьянов В.Ю., Фелицын С.Б. Вулканический пепел как фактор риска для авиации // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 65–72.
- Кодина Л.А., Галимов Э.М. Формирование изотопного состава углерода органического вещества “гумусового” и “сапропелевого” типов в морских отложениях // Геохимия. 1984. № 11. С. 1742–1756.
- Копелиович А.В. Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы // Тр. ГИН. Вып. 121. М.: Наука, 1965. 311 с.
- Коренчук Л.В. Ранневендский (волынский) этап // Геологическая история территории Украины. Докембрий. Киев: Наукова думка, 1993. С. 140–144.
- Костюхин М.Н., Степаненко В.И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона. Л.: Наука, 1987. 231 с.
- Костюченко С.Л. Структура и тектоническая модель земной коры Тимано-Печорского бассейна по результатам комплексного геолого-геофизического изучения // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М.: Гео-инвекс, 1994. С. 121–133.
- Аксенов Е.М. О вендском комплексе на востоке Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1967. № 9. С. 81–91.
- Аксенов Е.М. История геологического развития Восточно-Европейской платформы в позднем протерозое / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. СПб.: Изд-во ИГГД, 1998. 52 с.
- Аксенов Е.М., Волкова С.А. Вулканогенно-осадочные горизонты редкинской свиты валдайской серии // Докл. АН СССР. 1969. Т. 188. С. 635–638.
- Асеева Е.А. Поздненвендский (котлинский) подэтап // Геологическая история Украины. Докембрий. Киев: Наукова думка, 1993. С. 150–172.

- Макелви В.Е. Распространенность и распределение фосфора в литосфере // Фосфор в окружающей среде. М.: Мир, 1977. С. 24–46.
- Мак-Леннан С.М., Тейлор С.Р. Архейские осадочные породы и их соотношение с составом архейской континентальной коры // Геохимия архея. М.: Мир, 1987. С. 68–97.
- Махнач А.С., Веретенников Н.В. Вулканогенная формация верхнего протерозоя (венда) Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1970. 236 с.
- Мелекесцев И.В., Фелицын С.Б., Кирьянов В.Ю. Извержение вулкана Опала около 500 г. – крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 21–34.
- Мельников Н.Н., Горохов И.М., Турченко Т.Л. и др. Минералогическое и изотопное изучение тонкозернистых фракций глинистых пород верхнего докембрия Подольского Приднестровья // Изотопная геохимия и геохронология. Л.: Наука, 1990. С. 85–96.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шанарь В.Н. Геохимические особенности эксгальций Большого трещинного Толбачинского извержения. М.: Наука, 1980. 234 с.
- Мигдисов А.А., Балашов Ю.А., Шарков И.В., Шерстянников О.Г., Ронов А.Б. Распространенность редкоземельных элементов в главных литологических типах пород осадочного чехла Русской платформы // Геохимия. 1994. № 6. С. 789–803.
- Пиррус Э.А. Конкреции в вендском комплексе Восточно-Европейской платформы // Конкреции докембрия. Л.: Наука, 1989. С. 79–85.
- Пополитов Э.И., Вольнец О.Н. Геохимические особенности четвертичного вулканизма Курило-Камчатской островной дуги. Новосибирск: Наука, 1981. 183 с.
- Ронов А.Б., Мигдисов А.А., Хане К. К вопросу о распространенности и вещественном составе глин осадочного чехла Русской платформы // Геохимия. 1990. № 4. С. 467–482.
- Соколов Б.С. Очерки становления венда. М.: КМК Scientific Ltd, 1997. 156 с.
- Сочава А.В., Коренчук Л.В., Пиррус Э.А., Фелицын С.Б. Геохимия верхневендских отложений Русской платформы // Литология и полез. ископаемые. 1992. № 2. С. 71–89.
- Сочава А.В., Подковыров В.Н., Фелицын С.Б. Позднедокембрийский этап эволюции состава терригенных пород // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1994. № 2. С. 3–21.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 379 с.
- Уилли П.Дж. Петрогенезис и физика Земли // Эволюция изверженных пород. М.: Мир, 1983. С. 468–503.
- Фелицын С.Б. Перераспределение фосфора в вулканитах основного состава // Литология и полез. ископаемые. 2002а. № 1. С. 107–109.
- Фелицын С.Б. Вендский фосфогенез на Восточно-Европейской платформе и геохимические фации фосфоритообразования в позднем докембрии–кембрии / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. СПб.: ИГГД, 2002б. 36 с.
- Фелицын С.Б., Ваганов П.А., Кирьянов В.Ю. Распределение редких и рассеянных элементов в пеплах вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 23–35.
- Фелицын С.Б., Кирьянов В.Ю. Площадная изменчивость состава тефры некоторых вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 3–14.
- Фелицын С.Б., Кирьянов В.Ю. Подвижность фосфора при выветривании вулканических пеплов // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 3. С. 316–320.
- Фелицын С.Б., Сочава А.В. Eu/Eu* в аргиллитах верхнего венда Русской платформы // Докл. РАН. 1996. Т. 351. С. 521–524.
- Холленд Х. Химическая эволюция океанов и атмосферы. М.: Мир, 1989. 552 с.
- Холодов В.Н., Пауль Р.К. Проблемы генезиса древних фосфоритов // Литология и полез. ископаемые. 1993. № 3. С. 110–125.
- Янишин А.Л., Жарков М.А. Фосфор и калий в природе. Новосибирск: Наука, 1986. 190 с.
- Bartlett R.J., Kimble J.M. Behavior of chromium in soils // J. of Environmental Quality. 1976. V. 5. P. 379–396.
- Bingen B., Demaiffe D., van Breemen O. The 616 Ma Old Egersund Basaltic Dike Swarm // J. of Geology. 1998. V. 106. P. 565–574.
- Brasier M.D. Paleooceanography and Changes in the Biological Cycling of Phosphorus across the Precambrian – Cambrian boundary // Origin and Early Evolution of the Metazoa. N.Y.: Plenum Press, 1992. P. 483–523.
- Brazier S., Sparks R., Carey S., Sigurdsson H., Westgate J. Bimodal grain size distribution and secondary thickening in air-fall ash // Nature. 1983. V. 301. P. 115–119.
- Compston W., Sambridge M.S., Reinfrank R., Moczydlowska M., Vidal G., Claesson S. Numerical ages of volcanic rocks and the earliest faunal zone within the Late Precambrian of east Poland // J. of Geol. Soc. London. 1995. V. 152. P. 599–611.
- Cook P.J., Shergold J.H. Phosphorus, phosphorites and skeletal evolution at the Precambrian – Cambrian boundary // Nature. 1984. V. 308. P. 231–236.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1978. V. 42. P. 1199–1212.
- Felitsyn S., Gubanov A. Nd isotope composition of early Cambrian discrete basins // Geol. Magazine. 2002. V. 139. P. 159–169.
- Fleet A.J. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements // Rare Earth element geochemistry. Amsterdam, Oxford, N.Y., Tokyo: Elsevier, 1984. P. 343–373.
- Fölmi K.B. 160 m.y. record of marine sedimentary phosphorus burial: Coupling of climate and continental weathering under greenhouse and icehouse conditions // Geology. 1995. V. 23. P. 859–862.
- Gubanov A.P. Early Cambrian palaeogeography and the probable Iberia–Siberia connection // Tectonophysics. 2002. V. 352. P. 153–168.
- Juskowiakowa M. Bazalty wschodniej Polski // Biuletyn Inst. Geol. 1971. V. 245. P. 173–251.
- Keppler H. Experimental Evidence for the Source of Excess Sulfur in Explosive Volcanic Eruptions // Science. 1999. V. 284. P. 1652–1654.
- Lambert G., Cloarec M.-F., Pennisi M. Volcanic output of SO₂ and trace metals: A new approach // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1988. V. 52. P. 39–42.
- Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Doherty W., Fedorenko V.A. Geochemistry of the Siberian Trap of the

- Noril'sk area, USSR, with implication for the relative contributions of crust and mantle to flood basalt magmatism // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. V. 104. P. 631–644.
- Martin N.W., Grahdankin D.V., Bowring S.A. et al.* Age of Neoproterozoic Bilaterian Body and Trace Fossils, White Sea, Russia: Implications for Metazoan Evolution // *Science*. 2000. V. 288. P. 841–845.
- McCann T.* Lower Palaeozoic evolution of the north east German Basin/Baltica borderland // *Geol. Mag.* 1998. V. 135. P. 129–143.
- Meybeck M.* Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers // *Am. J. of Sci.* 1982. V. 282. P. 401–450.
- Nesbitt Y.W., Marcovics G., Price R.C.* Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1980. V. 44. P. 1659–1666.
- Poprawa P., Sliupa S., Stephenson R., Lazauskiene J.* Late Vendian-Early Palaeozoic tectonic evolution of the Baltic Basin: regional tectonic implications from subsidence analysis // *Tectonophysics.* 1999. V. 314. P. 219–239.
- Rollinson H.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. London: Longman, 1993. 352 p.
- Ruttenberg K.C.* Reassessment of the oceanic residence time of phosphorus // *Chem. Geol.* 1993. V. 107. P. 405–409.
- Sharpton V.L., Ward P.D.* Global catastrophes in earth history // *Geol. Soc. of Am. Spec. Papers.* 1990. V. 247. P. 1–631.
- Thorarinsson S.* The tephra-fall from Hekla on March 29th, 1947 // *The Eruption of Hekla, 1947–1948. Soc. Sci. Islandia.* 1954. V. 3. P. 1–68.
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Arndt N.T., Cauvel C., Bouse R.M., King Bi-S.W., Knight R.J., Siems D.F.* Isotopic and trace-elements on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1993. V. 57. P. 3677–3704.
- Yang J.D., Sun W.G., Wang Z.G., Xue Y.S., Tao X.C.* Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater // *Precambrian Res.* 1999. V. 93. P. 215–233.