

Геохимия литогенеза овручских кварцито-песчаников рифея

Белевцев Р.Я.¹, Шестопалов В.М.², Спивак С.Д.¹, Николаенко В.И.¹,
Блажко В.И.¹, Дудко В.С.¹, Крюченко Н.О.³, Кузенко С.В.¹,
Лазаренко Е.Е.¹, Самчук А.И.³, Ганевич А.Е.¹, Коченко В.Ю.¹

1 – Институт геохимии окружающей среды МЧС Украины
и НАН Украины, Киев, Украина

2 – Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

3 – Институт геохимии, минералогии и рудообразования
им. Н.П. Семененко НАН Украины, Киев, Украина

Изложены результаты минералого-петрографических, геохимических и экспериментальных исследований кварцито-песчаников овручской серии Украинского щита, статистической обработки, термодинамического и кинетического анализа полученных данных. Представлена геолого-геохимическая модель литогенеза этих пород, которые были первыми и самыми древними морскими осадками на Земле (их возраст 1600–1300 млн лет), отлагались при размыве первой суши, представленной поднятиями гранитоидной континентальной земной коры с выщелачиванием катионов из осадков кислой водой нижнерифейских морей. Оценены условия литогенеза кварцито-песчаников (рН морской воды – 0,15 и Eh ~+0,8 В), их изменение во времени и с глубиной, а также скорость кислотного выщелачивания и осадконакопления. Образование кварцито-песчаников характеризует решительный поворот в геологической истории Земли от развивающихся эндогенных магматических процессов в раннем докембрии к преобладанию самопроизвольных экзогенных процессов в рифей-фанерозойские геологические эпохи в связи с уменьшением внутренней энергии Земли и охлаждением земной коры, что привело к разрастанию суши, интенсивному осадконакоплению, появлению жизни на Земле, и позволяет также сделать вывод о том, что свободный кислород появился в земной атмосфере еще до рифея abiогенным путем. В результате анализа петрохимических характеристик и условий залегания пород авторы пришли к выводу, что толща кварцито-песчаников на Овручской возвышенности может служить благоприятной средой для изоляции радиоактивных отходов.

Введение. Среди многочисленных проблем геологии, петрологии и геохимии докембрая Украинского щита (УЩ) происхождение овручских кварцитов занимает особое место. Эти кварциты, точнее кварцито-песчаники, датируются нижним рифеем [9, 22, 27], относятся к наиболее древним платформенным осадкам и фиксируют начало нового позднедокембрийского этапа, который можно назвать коренным переломом в геологической истории УЩ [2, 3, 11, 20]. Однако, этой проблеме в геологической литературе уделено слишком мало внимания, значительно меньше, чем она того заслуживает. Имеются считанные научные труды, посвященные этой проблеме: В.П. Бухарев [8], И.Л. Личак [12], И.В. Богацкая и А.С. Дранник [7], Л.А. Таранова [24], В.М. Скобелев [22], В.А. Рябенко, Т.П. Михницкая [15], В.В. Фуртес [25], Р.Я. Белевцев и др. [1–5], Л.В. Шумлянский и С.В. Богданова [27].

Конечно, рифейские породы не могут сравниться по распространенности и массе с раннедокембрейскими или даже фанерозойскими. Но в этом-то и состоит одна из загадок геологической истории Земли: миллиард лет рифея (т. е. почти четверть этой истории) как бы выпадают из нее, поскольку по массе рифейские породы в десятки раз уступают как эндогенным магматогенно-метаморфогенным комплексам архея и раннего протерозоя, так и экзогенным осадочным толщам фанерозоя! На это обращал внимание В.М. Келлер [11], который отнес кварцито-песчаники нижнего рифея к самым древним осадкам на всех континентах и даже предполагал аномально низкую скорость осадконакопления в рифее.

Надо отметить, что литология осадков фанерозоя и пород раннего докембрая, которые отно-

© Белевцев Р.Я., Шестопалов В.М., Спивак С.Д., Николаенко В.И., Блажко В.И., Дудко В.С.,
Крюченко Н.О., Кузенко С.В., Лазаренко Е.Е., Самчук А.И., Ганевич А.Е., Коченко В.Ю., 2010

сят к метаморфизованным осадкам, совершенно разные. Фанерозойские осадки состоят в среднем на 50–60 % из глин, на 20 % из известняков и на 20 % из песчанистых пород. Состав пород раннедокембрийских комплексов совершенно иной. Континентальная кора сложена на 70–80 % из гранитоидов, которые, согласно представлению геологов-осадочников (нептунистов), образованы в результате гранитизации кварц-плагиоклазовых гнейсов, близких по химическому составу к полимиктовым кварц-полевошпатовым песчаникам. Настоящие глины в раннем докембре отсутствуют, также как и известняки. Не более 1 % осадочно-метаморфических пород относятся к полосчатым железистым кварцитам, белым кварцитам, глиноземистым гнейсам и доломитам. Однако, ни одна из отмеченных осадочно-метаморфических пород раннего докембра не обладает однозначными признаками "настоящих" осадков фанерозоя [2, 3, 20]. Более того, хорошо обосновано представление о генезисе биотитовых и биотит-гранатовых гнейсов раннего докембра как о продуктах метаморфизма древних тоналитов [2–4, 13]. Если это так, возникает вопрос: когда появились первые осадки и каковы они? По данным анализа осадочной оболочки континентов, самыми древними оказываются осадки нижнего-среднего рифея возрастом 1650–1050 млн лет [20]. Отложения нижнего рифея на всех континентах трангрессивно залегают на раннедокембриском гранитоидном фундаменте и весьма специфичны – представлены довольно мощной толщей кварцито-песчаников. Нередко последние подстилаены кислыми и основными вулканами, перекрываются глинистыми и карбонатными осадками среднего и верхнего рифея [11, 20].

Проблема литогенеза рифейских образований сложна и остается нерешенной. Продолжаются споры о стратиграфическом положении овручских кварцитов и подстилающих их збраньковских вулканитов. Кварцито-песчаники иногда включают остатки палеозойских организмов [16, 25]. Изотопный возраст гранитов-рапакиви – 1,75 млрд лет, а збраньковских вулканитов и кварцито-песчаников – 1,3–1,7 млрд лет [9, 22, 26]. Осадки овручской серии весьма специфичны и резко отличаются как от раннедокембрискых, так и от фанерозойских [2, 3, 20].

Исследование петрографии и геохимии преобладающих в овручской серии кварцито-песчаников, а также эксперименты, моделирующие их литогенез, мы надеемся, помогут разобраться не только в проблеме осадкообразования, но также в химической эволюции океана и в характере геологической эволюции докембра, в целом. С проблемой литогенеза рифейских кварцито-песчаников тесно связана эволюция химического состава океана в докембре. Ниже приведены результаты петрологических, геохимических и экспериментальных исследований, направленных на решение этих проблем.

В Украине рифейские осадочные породы – прежде всего мощная толща весьма характерных кварцито-песчаников (около 1000 м мощности) овручской серии, выходы которых на поверхность – не более 1 % территории Украинского щита.

Толща овручских кварцитов может быть благоприятной средой для захоронения радиоактивных отходов (РАО) [3, 5, 8, 23, 26]. Высота водоразделов над уровнем моря составляет на Овручском поднятии 170–280 м, а врезы рек – 120–140 м. Превышение водоразделов над врезами рек на Овручском поднятии – 30–140 м, т. е. водоразделы резко подняты над врезами рек и имеют мощную зону аэрации в 20–100 м. Зона аэрации кварцитов на водоразделах может использоваться как временное хранилище для низко- и среднеактивных РАО и отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Для глубинного хранилища долгоживущих РАО благоприятной средой изоляции будут кварциты на водоразделах, как тектонически стабильные, химически и радиационно устойчивые, а также слабо проникаемые породы кристаллического фундамента на глубине более 300–500 м от дневной поверхности.

Геолого-петрографические исследования. В Украине толща кварцито-песчаников и сланцев толкачевской свиты (около 1000 м мощности) перекрывает кислые и основные вулканиты збраньковской свиты (мощность до 300 м) и налегает на гранитоиды Коростенского массива [1, 6, 7, 8, 12, 16, 22, 24, 26–28]. Эти породы слагают Овручский и Белокоровичский синклиниории, где залегают субгоризонтально. Кварцито-песчаники составляют 90–95 % геологического разреза, а на сланцы приходится лишь 5–10 %. Мощность сланцевых прослоев небольшая – до нескольких дециметров, реже – до первых метров.

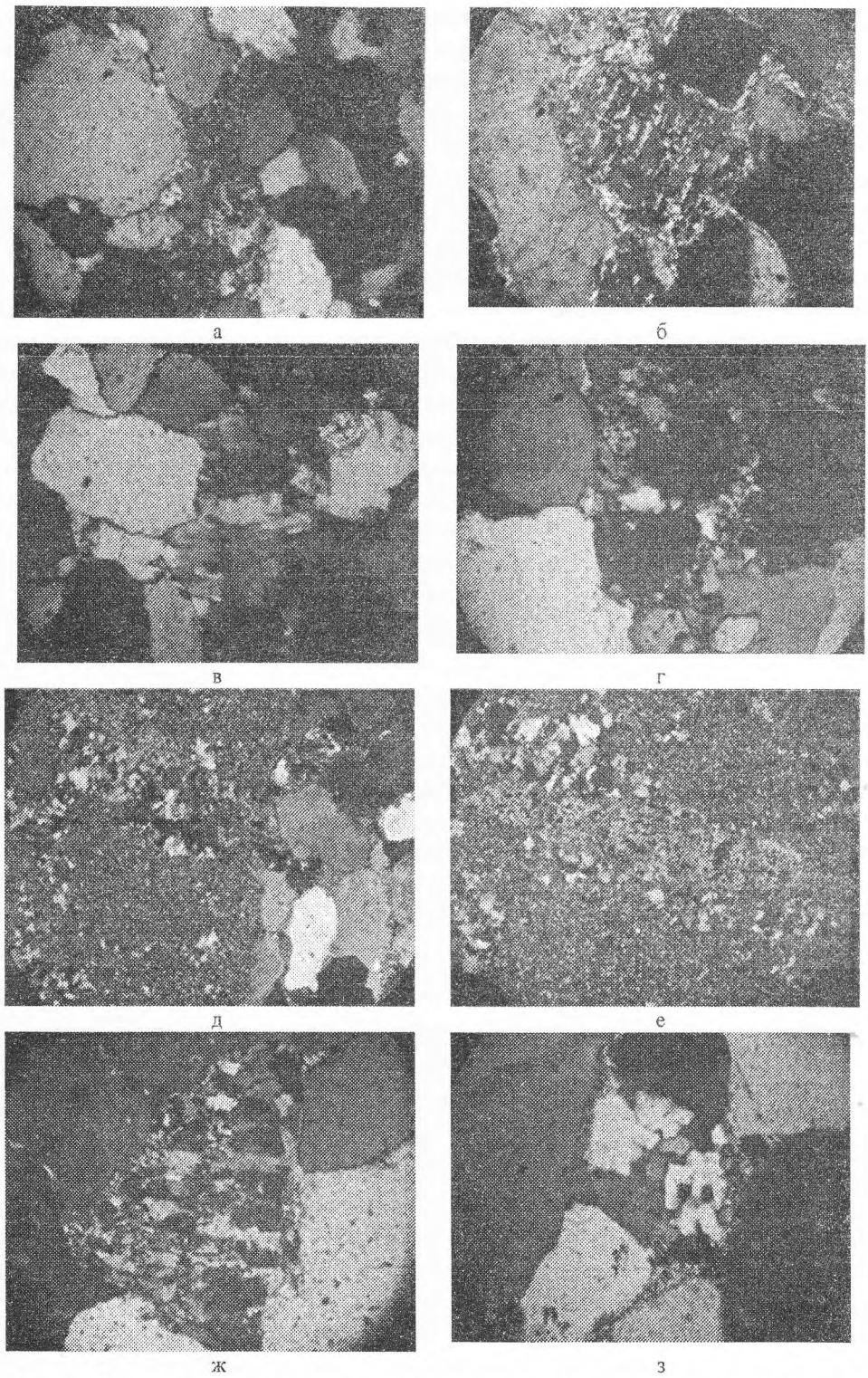
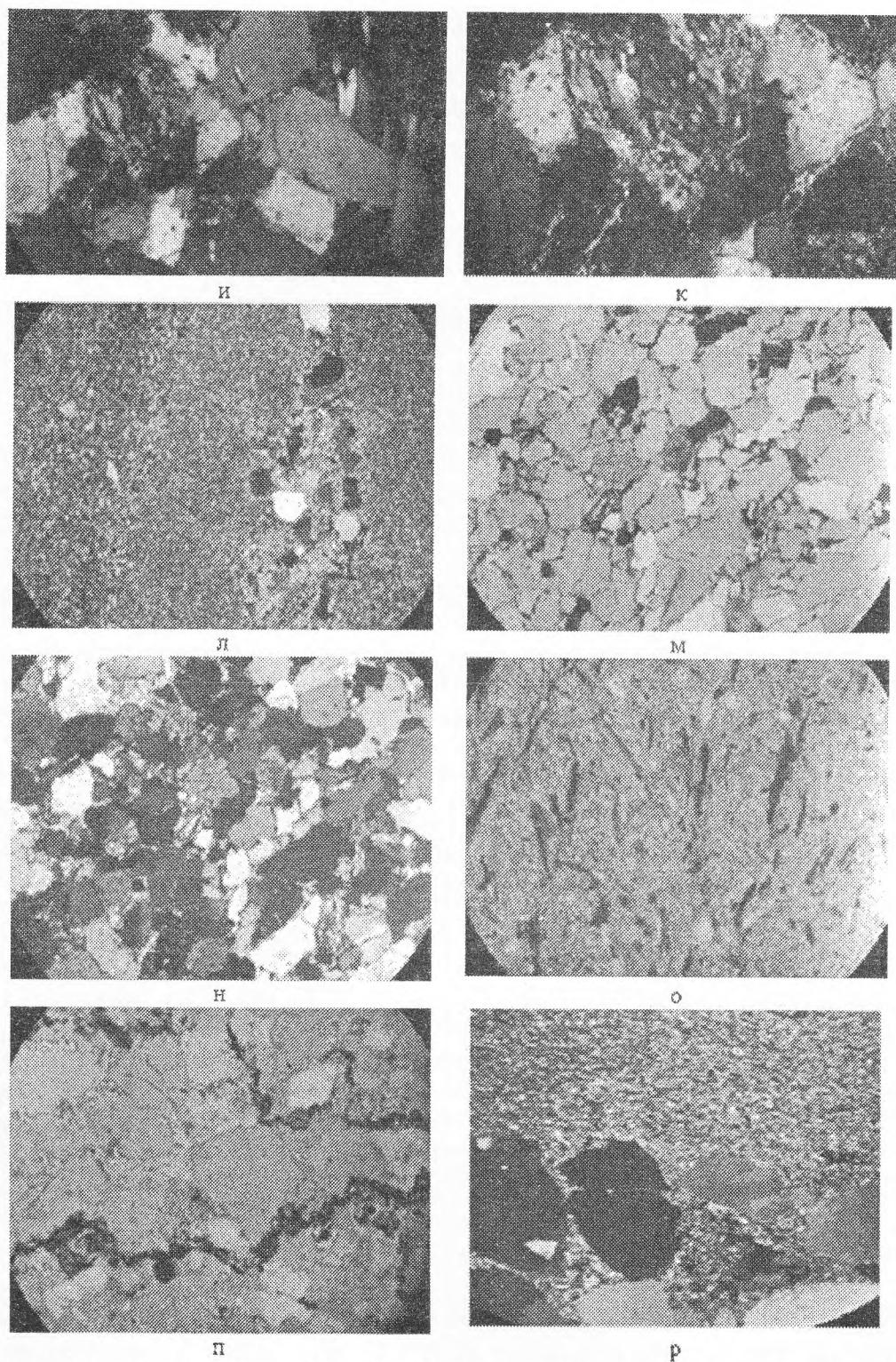


Рис. 1. Фотографии шлифов пород овручской серии под микроскопом: а – обр. ОВ-1/3: тонкозернистый алевритовый кремнистый цемент с размером зерен 0,005 мм между кварцевыми обломками в светлом же кварците-песчанике (рамка 1,0 мм, николи скрещены); б – обр. ОВ-2: псевдоморфоза по плагиоклазу, состоящая из кварца, альбита и пирофилита – по трещинам спайности. Размер зерна 0,2 мм в поперечнике (рамка 0,4 мм, николи скрещены); в – обр. ОВ-4/2: блочный кварц (рамка 0,8 мм), г – обр. тот же: два зерна кварца (0,13 мм в поперечнике) окружены т/з кремнистым цементом (рамка 0,6 мм, николи скрещены); д – обр. ОВ-9: сложное крупное включение (3,5 мм в поперечнике) т/з риолита с участками вторичного кварца в с/з кварцит-песчанике (с обломками Кв 0,3 мм и чешуйками Прф) (рамка 2,5 мм, николи скрещены), е – обр. тот же: Прф-Кв псевдоморфоза по ромбовидному порфировому выделению полевого шпата в окварцованным риолите (рамка 1,6 мм, николи скрещены); ж – обр. тот же: решетчатая структура кварцевого зерна – псевдоморфозы полевому шпату при выщелачивании из него катионов в кислой среде (поперечник зерна 0,4 мм), (рамка 0,8 мм, николи скрещены); з – обр. тот же: псевдоморфоза по ромбовидному порфировому выделению полевого шпата в окварцованным риолите (рамка 1,6 мм, николи скрещены).



николи скрещены); з – обр. тот же: прямоугольно-блочная структура кварца – псевдоморфозы по полевому шпату (рамка 0,6 мм, николи скрещены); и – обр. тот же: параллельно ориентированная структура в зернах кварца (рамка 1,6 мм), к – обр. тот же: (рамка 0,8 мм, николи скрещены); л – обр. ОВ-10, два прослоя алевролита (по 0,5 мм мощности, обломки Кв – 0,01–0,02 мм в поперечнике) в т/з Би-Хл-Му сланце (рамка 2,5 мм, николи скрещены); м – обр. 4-06: темный м/з кварцито-песчаник. Обломки 0,15–0,25 мм в поперечнике: преобладает кварц, встречаются вулканиты, черный ильменит, зеленые зерна турмалина, призмы циркона. Цемент – Кв, Прф, Гем (рамка 2,5 мм, николи параллельны), н – то же (николи скрещены), о – обр. 9-06: сланец с Кв, Би, Му, Хл, Мт, Ил. Обломки Кв – 0,01–0,05 мм в поперечнике (рамка 1,2 мм, николи параллельны), п – обр. ОВ-6: тонкие темные прослои мощностью 0,03–0,07 мм, сложенные гематитом, вадом, цирконом, ильменитом в м/з светлом кварцито-песчанике; обломки Кв 0,1–0,2 мм в поперечнике; окатанный циркон – 0,06 мм (ширина рамки 0,8 мм); р – обр. 5-06: контакт с/з кварцито-песчаника и т/з сланца; в цементе кварцито-песчаника и в сланце – Кв, Му, Би, Ил, Мт (рамка 2,5 мм, николи скрещены)

Таблица 1. Химический состав исследованных образцов, %

Химический состав	Номер образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	ОВ-1/3	ОВ-2	ОВ-4/2	ОВ-9	ОВ-10	1a-06	2a-06	4-06	7-06	9-06	14-06	17-06	3-08
SiO ₂	96,58	89,26	96,68	95,64	60,99	82,6	82,96	94,34	91,7	66,64	68,26	87,96	76,88
TiO ₂	0,11	0,07	0,07	0	0,86	1,88	1,88	0,22	0,26	1,48	1,6	0,46	0,46
Al ₂ O ₃	1,65	6,24	1,65	2,31	21,29	5,22	5,53	2,0	2,9	15,77	14,28	2,77	15,26
Fe ₂ O ₃	0,36 общ	0,56 общ	0,52 общ	0,34 общ	1,27	4,31	5,14	0,56	1,42	2,7	3,09	4,38	-
FeO	-	-	-	-	1,73	0,86	0,36	0,21	0,21	1,72	1,08	0,21	0,48 общ
MnO	< 0,01	< 0,01	0,15	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02
MgO	< 0,1	0,32	0,32	< 0,1	1,3	0,97	0,65	0,65	0,65	2,43	2,35	1,62	0,33
CaO	0,46	0,23	-	0,46	0,46	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,46	< 0,05	0,23	< 0,05	0,1
Na ₂ O	< 0,1	0,01	0,01	0,01	1,29	0,4	< 0,02	0,12	< 0,02	0,2	0,2	0,1	1,2
K ₂ O	< 0,1	1,69	-	0,5	6,69	1,89	1,8	0,4	1	5,02	4,96	0,9	0,8
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,06
H ₂ O-	0,1	0,06	0,1	0,04	0,18	0,16	0,11	0,11	0,16	0,32	0,22	0,14	0,4
П.п.п.	0,37	0,98	0,17	0,36	3,45	1,27	1,10	1,66	0,8	3,48	3,41	1,04	3,66
S	-	-	-	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04	< 0,01	0,02	0,02	0,02
Сумма	99,53	99,51	99,66	99,65	99,57	99,56	99,53	100,27	99,58	99,76	99,6	99,59	99,53
Copг	0,09	0,51	0,04	-	0,22	0,12	0,1	0,05	0,05	0,09	0,11	0,1	0,03
Размер обломков Kv, мм	0,15	0,2	0,3	0,5	0,015	0,15	0,15	0,8	0,2	0,02	0,02	0,2	0,1

Примечание. "—" – не определено.

Таблица 2. Средний химический состав (%) и стандартное отклонение (σ) пород овручской серии

Породы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п	Copг	L
Кварциты светлые	95,00	0,13	2,1	0,52	0,21	0,36	0,29	0,05	0,38	0,67	0,05	0,39
	2,06	0,11	0,52	0,53	0,04	0,28	0,24	0,05	0,4	0,6	0,03	0,27
Кварциты темные	85,7	1,07	4,94	3,53	0,43	0,89	0,09	0,13	1,57	1,1	0,21	0,18
	3,41	0,95	1,51	2,2	0,3	0,55	0,09	0,18	0,45	0,15	0,2	0,03
Сланцы	68,19	1,1	16,65	1,82	1,19	1,6	0,21	0,72	4,37	3,5	0,113	0,02
	6,58	0,54	3,15	1,31	0,7	0,992	0,18	0,6	2,51	0,11	0,08	0,01

Примечание. Вверху – средний химический состав, %, внизу – стандартное отклонение (σ), п.п.п. – потеря при прокаливании. Минеральный состав: светлые кварциты – Kv – Прф – Гем – Ц – Ил – Тур ± Грф ± Му ± Хл ± оксиды Mn; темные кварциты – Kv – Му – Гем – Ц – Ил – Тур – Хл ± Грф; сланцы – Му – Kv – Би – Гем – Хл – Ил – Ц – Грф ± Прф ± Аб ± Мт, Сул.

ки розовые, серые, зеленоватые, реже (в маломощных прослоях мощностью около 10 см) темные вишнево-красные. Обычно мелкозернистые (0,15–0,25 мм), менее распространены средне-зернистые (0,3–0,5 мм) и очень редки крупнозернистые.

Структура бластопсаммитовая, среди обломков резко преобладает кварц (95–100 %). Первые проценты составляют обломки окварцованных тонкозернистых порфиров, окатанных ильменитов, цирконов, турмалинов (рис. 1, д-з). Цемент составляет не более 5–10 % и представлен пирофиллитом, тонкозернистым кварцем, гематитом, реже оксидами марганца, а также мусковитом, хлоритом, биотитом. Окатанные обломки кварца достаточно редки, наибольшие зерна достигают 0,8–1,0 мм в поперечнике. Выделяются две главные разновидности кварцита-песчаников: светлые и темные. Преобладают светлые кварцито-песчаники, а темные составляют лишь отдельные

Породы овручской серии метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. Температура их метаморфизма 300–400 °C, давление – не более 2 кбар, что определено по присутствию андалузита и виридина [1, 3, 6, 8, 12, 22, 27, 28].

Типичный парагенезис минералов для кварцитов: кварц (Kv) + Прф, а для сланцев – Kv + Му + Би + Хл (рис. 1).

Кварцито-песчани-

прослої дециметрової мощності серед світлих. Встречаються секущі жилки кварца. Іноді наблюдаються знаки морської ряби. Замерена рябь в двох образцях: в першому амплітуда становить 18 мм, висота – 3,4 мм, асиметрія – 0,41; во второму амплітуда – 23 мм, висота – 4 мм, асиметрія – 0,31. Імеються тонкі изогнуті темні прослої (сутури), сложенні россыпями тяжелых минералов, среди светлых мелкозернистых кварцито-песчаников (рис. 1, п).

Судя по результатам петрографічного і хімічного аналіза (табл. 1, 2), кварцито-песчаники состоять на 85–95 % из обломочного кварца, блочного тонкозернистого кварца як псевдоморфози по остаточному кремнезему після вищелачування катіонів із полевых шпатів (рис. 1, в–к), содергат обломки т/з вулканітів, немного пирофілліта, мусковіту, темноцветов – гематіта, ільменіту, магнетіту, циркона, турмалину, редко Mn-шпинелі – галаксіта, графіту. Природа чорної окраски кварцито-песчаников определяється переважно наявністю гематіта, а також ільменіту, магнетіту, можливо графіту, редко оксидами марганця – до 0,15 % (обр. ОВ-4/2). В сланцах преобладають мусковіт (до 60 %) і кварц (до 40 %), перші проценти становлять біотіт і хлоріт (рис. 1, в, г, и, к), іноді присутствує пирофілліт і альбіт (обр. 3-08). Сланци содергат алевролітові, реже псаммітові обломки кварца (рис. 1, л, о), наблюдається присутність гематіта, хлоріту, біотіту, ільменіту, магнетіту, графіту, редко альбіту. Переход від кварцито-песчаников до сланцям хорошо фіксується по уменьшенню розмірів обломочних зерен кварца від 0,1 до 0,03 мм в поперечнику (рис. 1, л, о, р).

Были исследованы сотни образцов. Выполнен химический анализ 13 образцов, а также определен средний химический состав пород овручской серии (табл. 1, 2, рис. 1).

Описание образцов (табл. 1) (сокращенные названия минералов: Аб – альбит, Би – биотит, Гем – гематит, Грф – графит, Ил – ильменит, Кв – кварц, Мт – магнетит, Му – мусковит, Прф – пирофілліт, Сул – сульфід, Тур – турмалин, Хл – хлоріт, Ц – циркон, L – размер обломочных зерен, МС – минеральный состав.

1 – обр. ОВ-1/3 (рис. 1, а) – светлорозовый слоистый мелкозернистый (м/з) кварцито-песчаник; в цементе соприкосновения: Кв, Прф, Гем; сутуры между прослойками. Минеральный состав по результатам химического анализа (МС), %: Кв – 93, Прф – 7; визуально определены, %: обломки Кв (90) – 0,1–0,2 мм в поперечнике, риолита – 5, Прф – 2–5, Гем, Грф, Сул, Ц.

2 – обр. ОВ-2 (рис. 1, б) – светлозеленый м/з кварцито-песчаник, в цементе – Кв, Му, Ил, Мт, Хл; МС, %: Кв – 76, Му – 14, Прф – 7. Визуально, %: обломки Кв (80) – 0,2 мм в поперечнике; слюда – 15, Ил, Хл.

3 – обр. ОВ-4/2 (рис. 1, г, д) – темный м/з кварцито-песчаник с черными оксидами марганца. МС, %: галаксит ($MnAl_2O_4$) – 3, Кв – 96. Визуально, %: Кв (90) – обломки 0,3 мм в поперечнике, обломки вулканітів, чорні оксиди Mn, Гем.

4 – обр. ОВ-9 (рис. 1, д–к) – светлорозовый слоистый средне-крупнозернистый (с/з, к/з) кварцито-песчаник, в цементе Кв, Прф, Му, встречаются крупные обломки кварцевого порфира (до 4–5 мм в поперечнике). МС, %: Кв – 94, Прф – 2, Му – 4. Визуально, %: Кв (90) – 0,3–0,5 мм, редко до 2 мм, в среднем 0,5 мм в поперечнике, есть зерно Пл с каёмкою Прф, обломок тонко-зернистого (т/з) вулканіта (5–10) – до 3–4 мм, слюда в пленочном цементе.

5 – обр. ОВ-10 (рис. 1, л) – т/з сланцы с Кв, Му, Хл, Би, есть тонкие прослои кварцито-песчаника. МС, %: Кв – 20, Му – 60, Хл – 7, Пл – 10, Мт – 1, Ил – 2. Визуально, %: Кв (5–10) – 0,01–0,02 мм в поперечнике, преобладает Му, есть Би, прослои алевроліту (преобладает Кв – 0,03–0,1 мм в поперечнике) и прослои песчаника (Кв – 0,3 мм в поперечнике), Гем, Би, Хл.

6 – обр. 1а-06, прослой 5–7 см мощности темно-вишневого м/з кварцито-песчаника в светло-сером кварцито-песчанике. МС, %: Кв – 70, Му – 15, Хл – 10, Мт – 2, Ил – 4. Визуально, %: Кв (80) – обломки 0,1–0,2 мм в поперечнике, Му – 10, Гем – 3–4, Ил округлый – 1–2, Тур, Ц.

7 – обр. 2а-06, прослой 6–8 см мощности темно-вишневого м/з кварцито-песчаника в светло-сером м/з кварцито-песчанике (подобный обр. 1а-06). Визуально, %: Кв (70–80) – обломки 0,1–0,2 мм в поперечнике, Му – 10–20, Гем – 4–5, Ил округлый – 2–3, Тур, Мт, Ц.

8 – обр. 4-06 (рис. 1, м, н) – с-к/з розовый светлый кварцито-песчаник-гравеліт с белыми пирофіллітовими включениями (1–3 мм). МС, %: Кв – 90, Му – 4, Хл – 5. Визуально, %: Кв

(80–90) – обломки – 0,5–1,5 мм, ср. 0,8 мм, т/з вулканиты (единицы процентов) – обломки – 0,01–0,03 мм в поперечнике, Му, Ил, Гем.

9 – обр. 7-06, темно-вишневый м/з кварцит сливной. МС, %: Кв – 87, Му – 10, Хл – 3. Визуально, %: Кв (70–80) – обломки 0,2–0,3, ср. 0,2 мм в поперечнике, Му, Гем, Тур, обломки вулканитов.

10 – обр. 9-06 (рис. 1, о), темно-зеленый сланец. МС, %: Кв – 45, Му – 45, Би, Хл – 5, Ил – 3, Мт – 4. Визуально, %: преобладает Му – 50–60, мелкий Кв (30) – обломки 0,03–0,05 мм, ср. 0,02 мм в поперечнике, Гем, Би, Грф.

11 – обр. 14-06, темный сланец с гематитом, Му (подобный обр. 9-06). МС, %: Му – 50, Кв – 40, Би – 5, Ил – 4. Визуально, %: Му – 50–60, Кв (10–20) – обломки 0,01–0,03 мм, ср. 0,02 мм в поперечнике, Гем, Би.

12 – обр. 17-06, темный кварцит м/з, на контакте с серым (подобный обр. 7-06). Визуально, %: Кв (70–80) – обломки 0,2 мм в поперечнике, Му, Гем, вулканиты.

13 – обр. 3-08, розово-белый сланец (алевролит). МС, %: Кв – 41, Прф – 39, Му – 8, Аб – 11, Ил – 0,7. Мин. состав первичного осадка, %: – Кв – 54, каолинит – 26, Аб – 19, Ил – 0,7. Визуально, %: Кв (30–35) – обломки 0,05–0,15 мм, ср. 0,1 мм в поперечнике, Прф (и Му) – 40–50, Гем, Аб с серицитом.

Результаты статистической обработки петрохимических данных. Проведен статистический анализ результатов определения химического состава пород овручской серии. Использовано 13 анализов – 9 кварцитов и 4 сланцев (табл. 1). Среди кварцитов – 5 анализов светлых разновидностей и 4 – темных.

Построена таблица корреляционной связи результатов химического анализа пород (табл. 3) и графики корреляционных зависимостей (рис. 2). Кремнезем связан сильной корреляционной зависимостью со всеми компонентами, кроме Fe_2O_3 и размера обломков (табл. 3). Компоненты TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , Na_2O , K_2O , Feобщ и п.п.п. образуют "антагонистическую" группу к SiO_2 , а между собой они связаны положительной корреляционной зависимостью.

При анализе зависимости Al_2O_3 и SiO_2 можно наблюдать, что для темных и светлых кварцита-песчаников характерно увеличение содержания SiO_2 при небольшом Al_2O_3 и FeO (рис. 2, а, б). Зависимость между TiO_2 и Fe_2O_3 является сильной – с увеличением содержания одного компонента увеличивается содержание другого (рис. 2, в); при увеличении размера обломков – увеличивается содержание SiO_2 (рис. 2, г); содержание FeO и Fe_2O_3 минимально в светлых кварцита-песчаниках, FeO максимально в сланцах, Fe_2O_3 – в темных кварцита-песчаниках (рис. 2, д); при увеличении содержания SiO_2 увеличивается содержание Fe_2O_3 в темных кварцита-песчаниках, в светлых же при максимальном содержании SiO_2 содержание Fe_2O_3 минимально (рис. 2, е).

Таблица 3. Корреляционная таблица химического состава пород овручской серии

	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	п.п.п	Сорг	Loбл
SiO_2	-0,64	-0,95	-0,34	-0,88	-0,98	-0,74	0,04	-0,64	-0,93	-0,53	-0,90	-0,16	0,67
TiO_2		0,43	0,82	0,59	-0,72	0,62	-0,37	0,13	0,57	-0,05	0,45	-0,04	-0,48
Al_2O_3			0,07	0,81	-0,95	0,56	0,07	0,77	0,86	0,71	0,93	0,02	-0,64
Fe_2O_3				0,27		0,56	-0,44	-0,13	0,29	0,28	0,11	-0,06	0,27
FeO						0,74	0,02	0,45	0,94	0,30	0,71	0,15	-0,52
$\text{Fe}_{\text{общ}}$						-0,67	-0,51	-0,76	-0,88		-0,64		
MgO							-0,25	0,09	0,75	-0,07	0,64	-0,002	-0,43
CaO								0,11	0,13	0,19	-0,11	0,09	-0,08
Na_2O									0,46	0,96	0,71	0,02	-0,43
K_2O										0,35	0,75	0,28	-0,56
P_2O_5											0,62	0,04	-0,37
п.п.п												0,03	-0,49
Сорг													-0,23
Loбл													

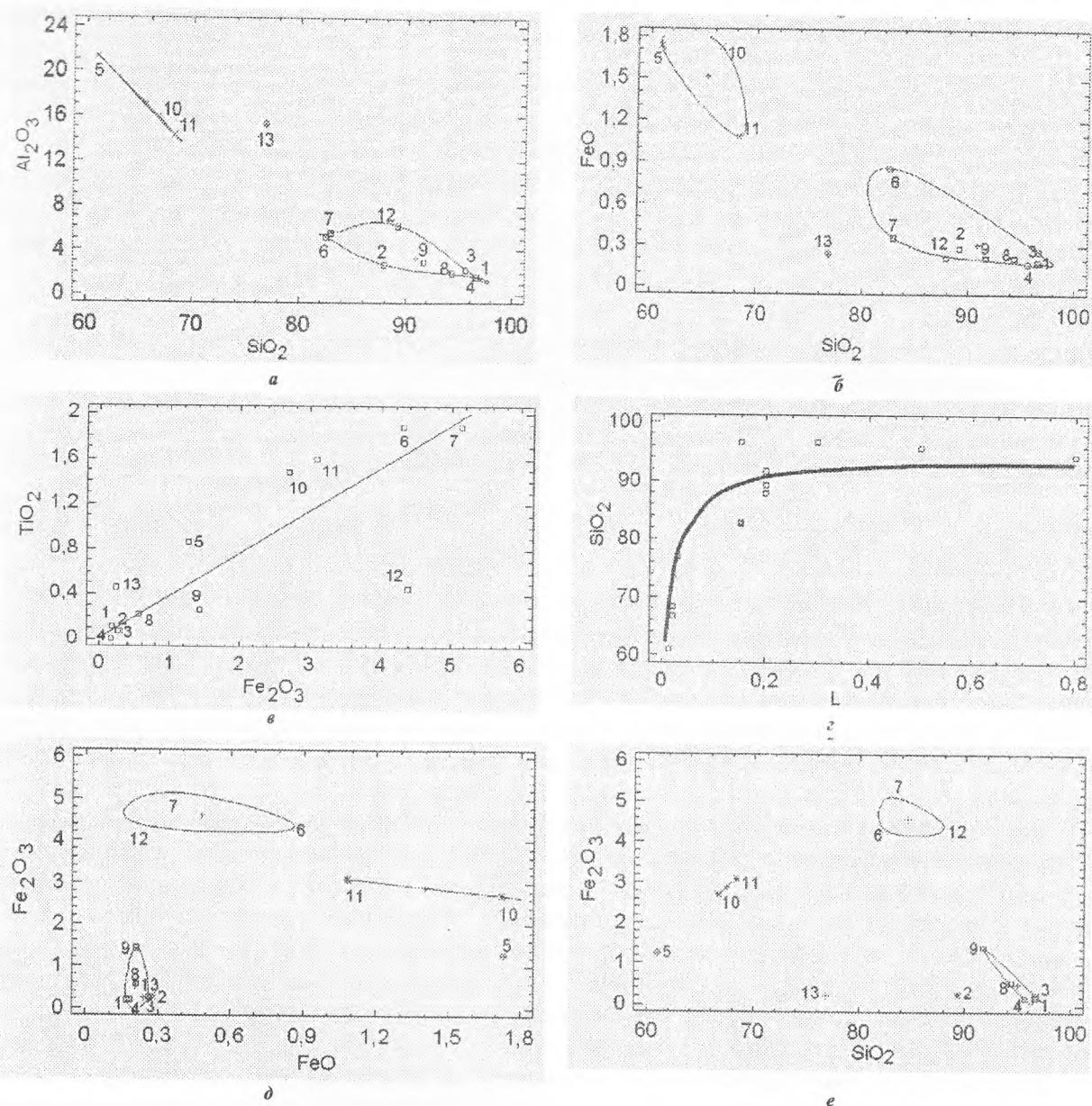


Рис. 2. Графики корреляционных зависимостей в породах овручской серии: Номера образцов (см. табл.1): 1 – светлые кварцито-песчаники с SiO_2 более 90 % (обр. 1-4, 9), темные кварцито-песчаники с SiO_2 82–88 % (обр. 6, 7, 12); сланцы (обр. 5, 10, 11); алевролитовый сланец (обр. 13); 4 – центры полей кластеров. Корреляционные зависимости: а – Al_2O_3 и SiO_2 , б – FeO и SiO_2 , в – TiO_2 и Fe_2O_3 , г – между SiO_2 и размером обломков кварца в кварцито-песчаниках и сланцах, д – FeO и Fe_2O_3 , е – Fe_2O_3 и SiO_2

При построении факторной диаграммы пород овручской серии (рис. 3) установлены три группы компонентов (факторов). Первая – SiO_2 и размер обломков, которые формируют на факторной диаграмме поле светлых кварцитов; вторая – Al_2O_3 , FeO , Na_2O , K_2O , п.п. – отвечает полю сланцев, третья – TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO – формирует поле темных кварцитов (рис. 3). Соответственно, выделяются три поля пород в зависимости от их состава (рис. 3): первое – по SiO_2 и размеру обломков, в которое попадают на факторной диаграмме светлые кварциты; второе – по Al_2O_3 , FeO , Na_2O , K_2O , п.п., соответствующее полю сланцев (обр. 5, 10, 11), а третье – по TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO – полю темных кварцитов (обр. 6, 7, 12).

Резкая отрицательная корреляция между SiO_2 и остальными катионами в породах овручской серии и особенно в светлых кварцито-песчаниках (рис. 2, а, б, 3), а также то, что содержание SiO_2 в этих кварцито-песчаниках составляет 93–97 %, позволяет предположить

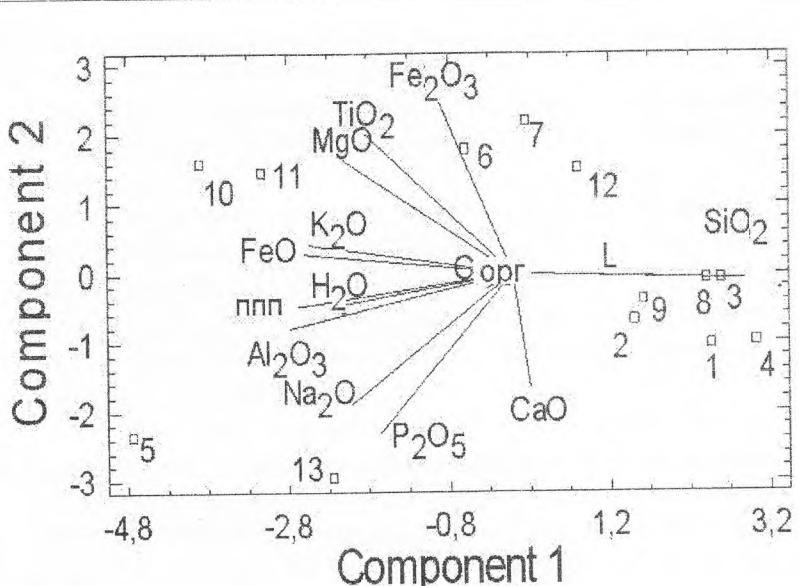


Рис. 3. Факторная диаграмма пород овручской серии.

Фактор 1 (Component 1):

$$\begin{aligned} SiO_2 &= +0,37, TiO_2 = -0,23, \\ Al_2O_3 &= -0,36, Fe_2O_3 = -0,12, \\ FeO &= -0,32, MgO = -0,27, \\ CaO &= 0,03, Na_2O = -0,27, \\ K_2O &= -0,33, P_2O_5 = -0,21, \\ H_2O &= -0,28, ppp = -0,34, \\ Сорг &= -0,04, \\ размер обломков (L) &= -0,26. \end{aligned}$$

Фактор 2 (Component 2):

$$\begin{aligned} SiO_2 &= -0,02, TiO_2 = 0,39, \\ Al_2O_3 &= -0,15, Fe_2O_3 = 0,50, \\ FeO &= 0,08, MgO = 0,32, \\ CaO &= -0,32, Na_2O = -0,37, \\ K_2O &= 0,05, P_2O_5 = -0,45, \\ H_2O &= -0,09, ppp = -0,09, \\ Сорг &= -0,05, \\ размер обломков (L) &= -0,02 \end{aligned}$$

специфические условия их литогенеза. Для концентрации кремнезема и отложения кварцевых песков при литогенезе возможны два процесса: динамический – отделение глинистых частиц от псаммитового кварца на морском шельфе при абразии выветрелых гранитоидов или речных песков; и химический – кислотное разложение силикатов, вынос катионов в морскую воду с отложением остаточного кремнеземистого осадка. В обоих случаях речь идет о песчаных осадках, которые быстро перемещаются и осаждаются, в отличие от алевритовых частиц, скорость осаждения которых меньше на порядок и которые легко слипаются [21, с. 198]. Среди овручских пород преобладают мелкозернистые песчаники.

Если принять динамический процесс литогенеза овручских песчаников, то при размытии выветрелых гранитоидов континентальной коры кварцевые пески составили бы только 30–35 % осадочных продуктов этого процесса, а 70 % составляли бы глины, как продукты выветривания полевых шпатов. При размытии свежих гранитоидов образуются олигомиктовые пески с преобладанием обломков полевых шпатов. В фанерозойских осадочных толщах на долю глинистых отложений приходится 70 %, а олигомиктовые пески составляют не более 20–30 %. Кварцевые же пески достаточно редки и образуют прослои мощностью не более нескольких десятков метров [21].

Отсюда вывод: для пород овручской серии наиболее обоснованной является модель химического литогенеза. Суть ее в следующем: вода рифейских морей была кислой и при отложении продуктов разрушения гранитоидов континентальной коры в виде мелководных осадков кислой морской водой выщелачивались катионы, а отлагались кварц-кремнеземистые пески. Иначе невозможно объяснить практически полное отсутствие катионов в мощной километровой овручской толще, в породах которой среднее содержание кремнезема составляет 92 %. В преобладающих светлых кварцито-песчаниках нет обломков полевых шпатов, гидрослюдистого или карбонатного цемента, органики, а содержание глинозема не превышает 2 %. Маломощные прослои мусковитовых сланцев составляют около 5 % массы всей толщи, а первичные алеврито-глинистые эквиваленты этих сланцев вероятно отлагались на значительной морской глубине уже в слабокислой среде.

Светлые кварциты отлагались на малой морской глубине близ берегов (менее 20–30 м), с чем связан размер псаммитовых обломков [21]. Темные кварциты отлагались несколько глубже – скорее всего в углублениях недалеко от берега моря (первые десятки метров), о чем также свидетельствует меньший размер обломков кварца. Сланцы, как алеврито-глинистые отложения, формировались на значительно большей глубине – 100 м и более [21]. Алеврито-песчанистые осадки являются прибрежными и откладывются на глубине до 70–100 м. Об этом свидетельствуют наличие в сланцах обломков кварца алевритового размера – 0,01–0,03 мм, а также

тонких прослоев алеврито-песчаников. Для этих осадков характерно постоянное или периодическое взмучивание в зоне морского прибоя. Карбонаты, а тем более карбонатные отложения в разрезе овручской серии рифея отсутствуют. Содержание углерода незначительно – до 0,1–0,2 %.

Коэффициенты корреляции между Fe_2O_3 и FeO и между Fe_2O_3 и SiO_2 , незначимы (табл. 3, рис. 2, д, е), что исключает окисление железа в этих породах при современном выветривании. Видимо, высокое содержание Fe_2O_3 в темных кварцito-песчаниках связано с окислительными условиями при литогенезе, а высокое FeO в сланцах – с восстановительными условиями при отложении глубоководных алевро-глинистых осадков.

Взаимоотношение между оксидами железа Fe_2O_3 и FeO отражают изменение окислительно-восстановительных условий при петрогенезисе, т.е. при литогенезе, метаморфизме и выветривании осадочных пород. При литогенезе песков преобладал гематит. Содержание последнего особенно значительно в темных кварцito-песчаниках, а отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{FeO}$ в кварцito-песчаниках составляет 7–10. В то же время, зависимость между содержанием оксидов железа в темных кварцитах и сланцах отрицательна, а отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{FeO}$ уменьшается от 7,0 в темных кварцитах до 1,0–1,5 в сланцах (рис. 2, д). Видимо это определялось условиями литогенеза, а не выветривания, поскольку при выветривании во всех породах была бы примерно одинаковая величина отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{FeO}$.

Основываясь на этих данных, можно сделать вывод о том, что в нижнем рифее кварцевые пески как первичные эквиваленты кварцito-песчаников отлагались в более кислотной и окислительной обстановке, нежели алеврито-глинистые отложения, которые являются первичными эквивалентами сланцев и отлагались на большей глубине.

Экспериментальное моделирование литогенеза пород овручской серии. Для обоснования генетической модели литогенеза кварцito-песчаников овручской серии в нижнем рифее, а также модели кислого океана, проведены соответствующие эксперименты по выщелачиванию катионов из гранитоидов в кислой среде.

Можно рассчитать исходную кислотность (pH) океанической воды в нижнем рифее (1600 млн лет назад), исходя из того, что до этого рубежа океан составлял сплошную оболочку, на Земле отсутствовала суши и поэтому не отлагались обломочные осадочные породы [2, 3].

Для расчетов использовались данные А.Б. Ронова и др. [20] о химическом составе осадочной оболочки континентов, Е.К. Мархинина [14] о составе вулканических газов, а также данные о составе океанической воды [15].

Содержание солей в современной океанической воде следующее, г/л: $\text{NaCl} = 28$, $\text{KCl} = 0,7$, $\text{MgCl}_2 = 3,5$, $\text{CaSO}_4 = 1,5$, $\text{MgSO}_4 = 2,3$. Среди катионов преобладают натрий (80 %) и магний (16 %), а среди анионов – хлор – 90 %. Содержание хлора в морской воде – 20 г/л. Отсюда, масса океанической воды составляет $1370 \cdot 10^{18}$ кг, а масса хлора – $27 \cdot 10^{18}$ кг. В осадочной оболочке континентов неогея (рифей-фанерозой) отложилось $15 \cdot 10^{18}$ кг хлора [20], а при вулканизме выделилось $(3-10) \cdot 10^{18}$ кг хлора [14]. Видимо, в нижнерифейских морях содержание хлора составляло $(30-40) \cdot 10^{18}$ кг, что соответствует его концентрации 22–30 г/л. Если допустить, что вода дорифейского океана практически не содержала солей [2, 3] и представляла собой раствор соляной кислоты, то она имела $\text{pH} = 0,1-0,2$. Вклад в pH рифейской морской воды серной кислоты был незначительным – порядка 5 %.

При нижне-среднерифейском литогенезе (1600–1050 млн лет назад) отложилось не менее $70 \cdot 10^{18}$ кг осадков, преимущественно кварцевых песков [20]. При этом, из пород континентальной коры было выщелочено в морскую воду $(10-20) \cdot 10^{18}$ кг катионов, для чего необходимо было затратить $(20-30) \cdot 10^{18}$ кг HCl . При массе воды океана около $1300 \cdot 10^{18}$ кг дорифейская морская вода, вероятно, представляла собой 2,5 % разбавленный раствор соляной кислоты с $\text{pH} = 0,15$. Эта величина является наиболее вероятной для дорифейского и нижнерифейского океана.

Эксперименты по кислотному выщелачиванию проведены с наиболее распространенными породами докембрия УЩ – биотит-рогообманковыми гнейсами (ближкими к тоналитам), и гранитами. Использована преимущественно мелкопесчаная фракция (0,1–0,25 мм) этих пород, в некоторых опытах добавлена алевритовая фракция.

Методика исследований. Исследовали гнейс (биотит-амфиболовых плагиогнейс: обр. К-10, пробы Гн-1, Гн-2, Гн-3, Гн-4) и гранит (биотит-амфиболовый гранит-рапакиви: обр. 1/131, пробы Гр-1, Гр-2, Гр-3, Гр-4) (табл. 4). Породы были раздроблены до мелкопесчаного размера зерен – меньше 0,25, но более 0,1 мм. Для опыта брали 5 г песчаной фракции породы, которую помещали в 50 мл водного раствора соляной кислоты. Режим опыта подвижный, температура 25 °С. Только в опытах Гн-2 и Гр-2 брали 10 г песчано-алевритовой фракции породы (< 0,25 мм). Минеральный состав исходного гнейса (обр. К-10, ингульский гнейс, Клинцовское золоторудное месторождение), %: Кв – 25, Пл – 25–35, Орт – 20, Би – 8, Рог – 7, Му (Сер) – 4, Ил – 1. Минеральный состав исходного гранита (обр. 1/131, с. 1, гл. 556 м, Коростенский массив), %: Кв – 30, перитит – 45, Пл₁₀ – 15, Би – 5, Рог – 5, Ил – 1. Продолжительность опытов 80 дней.

После 12 дней, 40 дней и окончания эксперимента (через 80 дней) определяли химический состав твердых фракций (табл. 4). Методом атомной абсорбции определены железо, алюминий, магний, кальций, методом пламенной фотометрии – содержание натрия и калия. Постоянно замеряли pH раствора.

Химические элементы выщелачиваются из пород кислотой с разной скоростью (табл. 4). За 80 дней из гнейсов раствором с начальным pH = 0,15 (пр. Гн-1) было выщелочено катионов, %: суммарно – 6,8 от исходной породы, в том числе титана – 62, железа – 43, калия – 40, кальция – 11, алюминия – 4, натрия – 1.

Выщелачивание катионов меньшее в слабо кислых растворах. Для растворов с начальным pH = 1,0 (пр. Гн-3) выщелачивание отмечается, %: магния – 19, калия – 15, кальция – 14 и титана – 8 (сумма выщелоченных катионов – 0,6 %).

Выщелачивание при начальном pH = 3,0 (пр. Гн-4) еще меньшее, %: титана – 16, магния – 14, кальция – 11; суммарно – 0,2. Суммарное выщелачивание катионов можно также определять по изменению содержания SiO₂, которое, не переходя в раствор, увеличивается в нерастворенной породе за счет выноса катионов.

Таблица 4. Изменение химического состава пород при разных pH среды, %

Состав	Порода									
	Гнейс					Гранит				
	К-10	Гн-1	Гн-2	Гн-3	Гн-4	1/131	Гр-1	Гр-2	Гр-3	Гр-4
pH	–	0,15	0,15	1,00	3,00	–	0,15	0,15	1,00	3,00
		0,56	0,78	2,00	8,00		0,31	0,38	1,71	6,51
SiO ₂	67,39	74,20	72,24	68,00	67,18	72,36	74,64	74,72	74,72	72,93
TiO ₂	0,53	0,20	0,34	0,49	0,44	0,35	0,23	0,18	0,18	0,31
Al ₂ O ₃	13,03	12,54	12,67	13,75	13,45	12,53	13,23	12,87	12,87	13,20
Fe ₂ O ₃	0,65	0,20	0,60	1,25	0,85	0,20	0,78	0,38	0,38	0,52
FeO	4,36	2,66	3,02	4,53	5,17	2,15	1,37	1,44	1,44	2,44
MnO	0,10	0,06	0,04	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03
MgO	2,81	0,49	1,13	2,27	2,43	0,82	0,10	0,10	0,10	0,49
CaO	2,87	2,55	2,78	2,42	2,55	1,38	0,92	0,92	0,92	1,16
Na ₂ O	2,88	3,04	3,69	3,02	2,90	3,02	3,46	3,16	3,16	2,80
K ₂ O	2,82	1,70	1,40	2,39	2,90	5,22	4,70	4,40	4,40	3,80
P ₂ O ₅	0,21	0,09	0,15	0,17	0,21	0,06	0,03	0,06	0,06	0,09
H ₂ O [–]	0,41	0,48	0,40	0,34	0,44	0,37	0,10	0,32	0,32	0,10
п. п. п.	2,18	1,69	1,53	1,63	2,20	1,05	0,71	1,17	1,17	1,96
Сумма	100,28	99,92	100,01	100,32	100,19	99,55	100,20	99,66	99,66	99,91
Σ катионов	30,05	23,44	25,67	30,18	30,74	25,71	24,71	23,47	23,47	24,75

Примечание. Продолжительность опытов 80 дней, pH приведено до (вверху) и после (внизу) опыта

Таким образом, суммарное выщелачивание катионов из гнейсов за 80 дней так зависит от pH раствора: pH = 0,15 – вынос катионов 6,8 %, pH = 1,0 – вынос 0,6 %, pH = 3 – вынос 0,2 %.

Выщелачивание катионов определено также при помощи атомно-абсорбционного анализа растворов. Данные последнего примерно совпадают с физико-химическим анализом пород, кроме самых трудно выщелачиваемых. По анализу растворов в пробе Гн-1 содержание алюминия уменьшилось за 80 сут на 5 %, натрия – на 0,6 %; в Гн-3 – алюминия на 1,5 %, а Na₂O на 0,4 %. Из Гн-4 алюминий практически не выщелачивается, а натрий – на 0,4 %. Отмеченные соотношения объясняются тем, что при незначительном выщелачивании катиона его содержание

в составе породы может даже несколько увеличиться за счет более значительного выноса других катионов.

Гранит растворяется в соляной кислоте примерно в три раза хуже гнейса. За 80 дней из гранита (пр. Гр-1) раствором с начальным pH = 0,15 было выщелочено катионов, %: суммарно из всей породы – 2,3; магния – 90, кальция – 33, титана – 17, калия – 10, железа – 9, алюминия – 3, натрия – 1,5.

Кинетика кислотного выщелачивания катионов из гранитоидов. Опыты по кинетике проводились с образцами пород – биотит-амфиболовых плагиогнейсов (пр. Гн-2, Гн-3) и биотит-амфиболовых гранитов рапакиви (пр. Гр-2, Гр-3).

Скорость выщелачивания из пород катионов кислотой можно оценить по скорости изменения pH.

При проведении опыта с образцом Гн-2 начальное pH составляло 0,18, через 62 сут – 0,81 (рис. 4, а), при моделировании ситуации на 10000 сут (рис. 4, б) pH вытяжки составило бы 8, при этом формула примет вид: $pH = 0,169466 + 0,0782865 \cdot \sqrt{t}$.

При проведении опыта с образцом Гн-3 начальное pH составляло 0,94, через 81 сут – 2,04 (рис. 4, в), при моделировании ситуации на 3200 сут (рис. 4, г) pH вытяжки составило бы 8, при этом формула примет вид: $pH = 1,0059 + 0,12394 \cdot \sqrt{t}$.

При проведении опыта с образцом Гр-2 начальное pH составляло 0,15, через 80 сут – 0,40 (рис. 5, а), при моделировании ситуации на 63000 сут (рис. 5, б) pH вытяжки составило бы 8, при этом формула примет вид: $pH = 0,162 + 0,0314 \cdot \sqrt{t}$.

При проведении опыта с образцом Гр-3 начальное pH составляло 0,94, через 81 сут – 1,74 (рис. 5, в), при моделировании ситуации на 6400 сут (рис. 5, г) pH вытяжки составило бы 8,05, при этом формула примет вид: $pH = 1,0059 + 0,12394 \cdot \sqrt{t}$.

Термодинамика литогенеза пород овручской серии. Поскольку кварцевые пески, как первичные эквиваленты кварцito-песчаников овручской серии рифея, образовались в результате размыва коростенских гранитов, содержание кварца в которых не превышает 30–35 %,

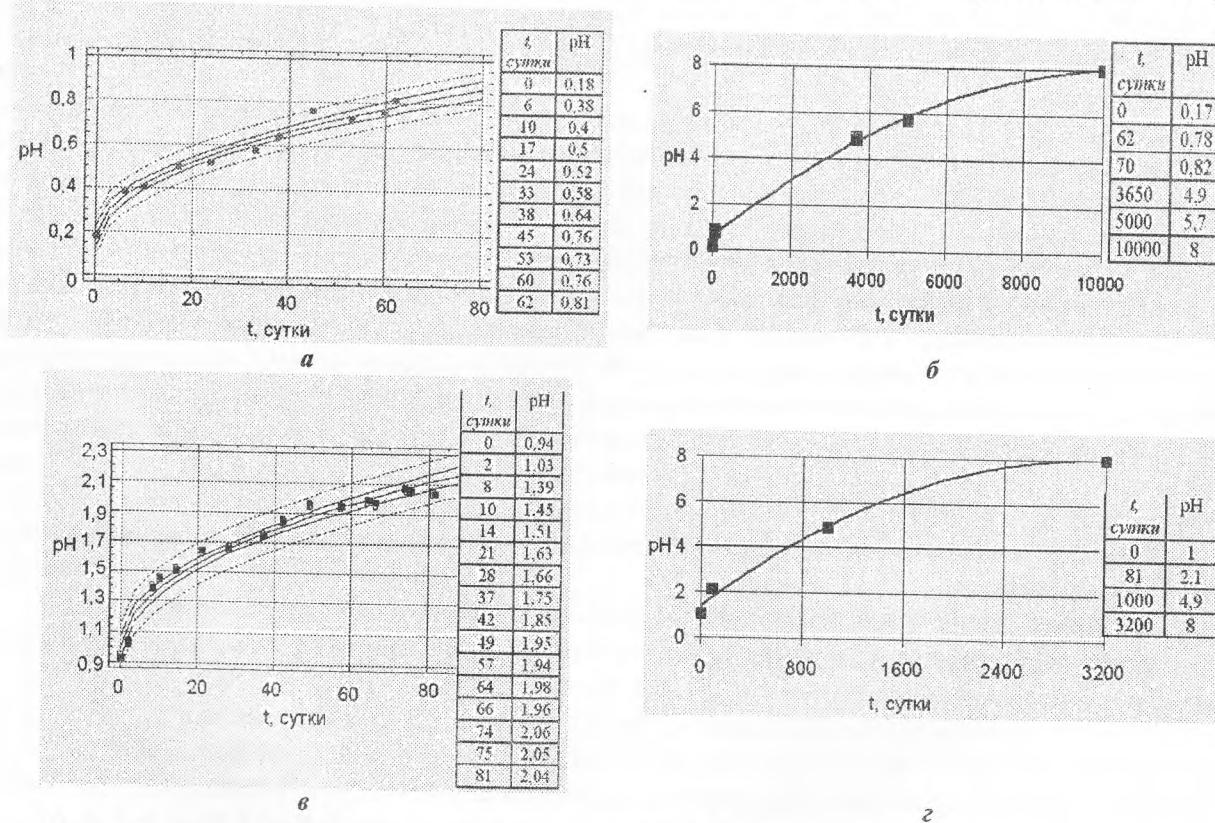


Рис. 4. Кинетика кислотного выщелачивания биотит-амфиболовых плагиогнейсов: а – пр. Гн-2 (эксперимент), б – пр. Гн-2 (прогноз); в – пр. Гн-3 (эксперимент), г – пр. Гн-3 (прогноз)

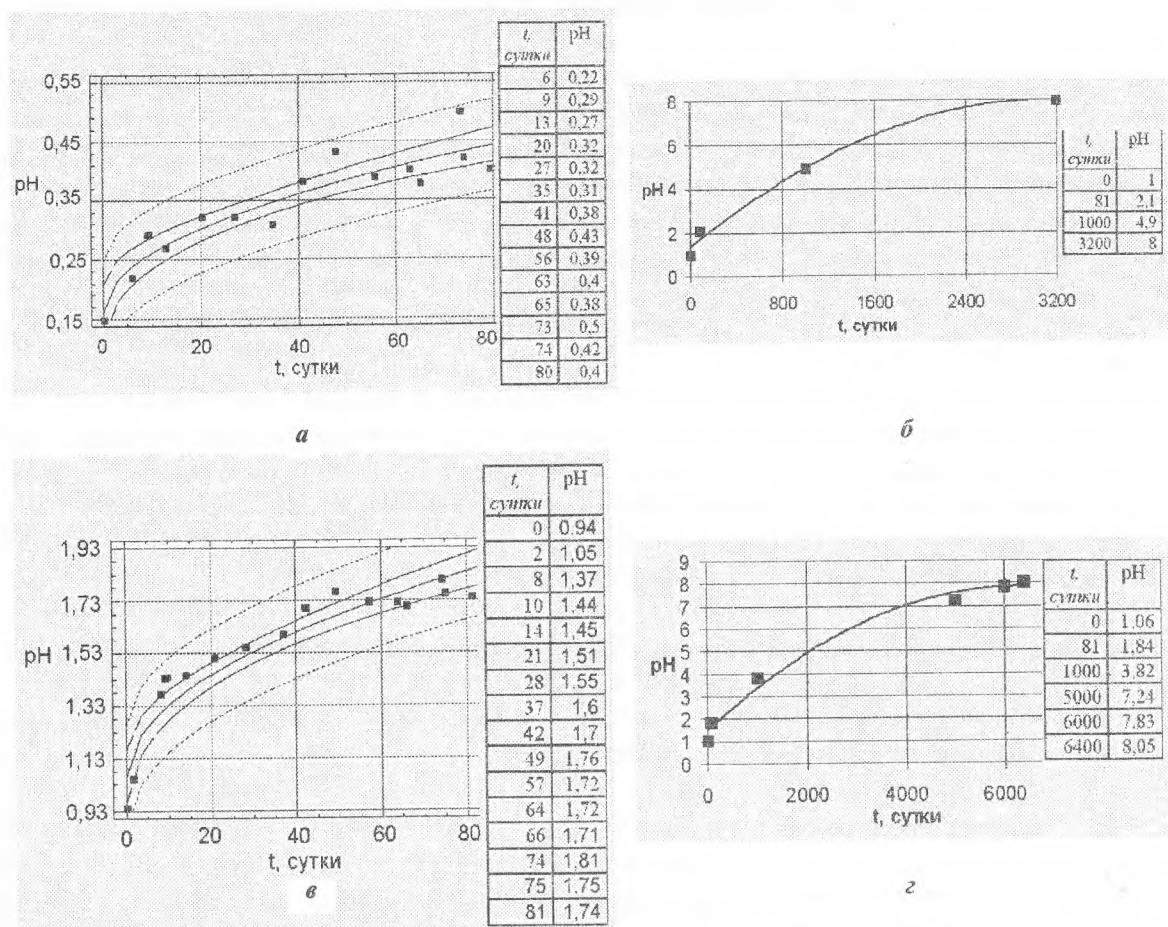


Рис. 5. Кинетика кислотного выщелачивания биотит-амфиболовых гранитов рапакиви. а – пр. Гр-2 (эксперимент), б – пр. Гр-2 (прогноз); в – пр. Гр-3 (эксперимент), г – пр. Гр-3 (прогноз)

наиболее важным процессом при их литогенезе является химическое разложение силикатов и оксидов гранитов. Иными словами, в процессе разрушения гранитов практически все минералы растворялись в морской воде (кроме кварца), а также остаточного кремнеземистого каркаса силикатов, которые выпадали в осадок в виде мелко-, реже – среднезернистого кварцевого песка. Это возможно только в сильно кислом водном растворе, в котором не растворим кремнезем, но в который хорошо переходят катионы Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K [10]. Из этих катионов наиболее показательным для оценки кислотно-щелочных условий литогенеза осадков овручской серии является алюминий, так как он хуже других катионов растворим в кислотах и, в то же время, его содержание довольно значительно в материнских породах. Подобные процессы наблюдались при образовании дерново-подзолистых почв ($\text{pH} = 3.5\text{--}4$) на водо-ледниковых суглинках (Полесье). Процесс состоял в выщелачивании катионов из суглинков с увеличением содержания кремнезема в них от 80–85 до 95 % в лесных почвах [5].

Растворимость катиона алюминия в водном растворе можно определить по реакции выпадения гиббсита:



$\Delta G(1)_{298} = + 47,24 \text{ кДж/моль}$; $\lg K(1) = -8,17$; $\lg [\text{Al}^{3+}(\text{в})] = 8,17 - 3\text{pH}$, где ж – жидкая фаза, в – водная, тв – твердая.

Согласно реакции (1), содержание $\text{Al}^{3+}(\text{в})$ начинает быстро увеличиваться в кислой среде от 0,004 г/л при $\text{pH} = 4$ до 4 г/л при $\text{pH} = 3$. Судя по этим данным, pH морской воды при литогенезе нижнерифейских кварцевых песков для выщелачивания алюминия должен быть менее 2. Таким образом, можно предположить, что состав нижнерифейской морской воды резко отличается от современного более высокой кислотностью.

Таблица 5. Изменение мольной массы минералов гранитоидов при реакциях кислотного выщелачивания катионов из биотита и полевых шпатов с образованием остаточного кремнезема – $\text{SiO}_2(\text{тв})$

Номер реакции	Уравнение	Масса, г/моль, исходных минералов (Би, ПШ)	Масса, г/моль конечного продукта – $\text{SiO}_2(\text{тв})$	Отношение, (в %) массы $\text{SiO}_2(\text{тв})$ к исходным минералам
1	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_{2,5}\text{Al}_2\text{Si}_{2,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{тв}) + 12\text{H}^+(\text{в}) = \text{K}^+(\text{в}) + 2,5(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{в}) + 2\text{Al}^{3+}(\text{в}) + 2,5\text{SiO}_2(\text{тв}) + 7\text{H}_2\text{O}_{\text{Ж}}$	470	180	40
2	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{тв}) + 4\text{H}^+(\text{в}) = \text{K}^+(\text{в}) + \text{Al}^{3+}(\text{в}) + 3\text{SiO}_2(\text{тв}) + 2\text{H}_2\text{O}_{\text{Ж}}$	278	180	65
3	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{тв}) + 8\text{H}^+(\text{в}) = \text{Ca}^{2+}(\text{в}) + 2\text{Al}^{3+}(\text{в}) + 2\text{SiO}_2(\text{тв}) + 4\text{H}_2\text{O}_{\text{Ж}}$	278	120	43
4	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{тв}) + 4\text{H}^+(\text{в}) = \text{Na}^+(\text{в}) + \text{Al}^{3+}(\text{в}) + 3\text{SiO}_2(\text{тв}) + 2\text{H}_2\text{O}_{\text{Ж}}$	262	180	69

Выщелачивание катионов магния, железа, калия, алюминия, кальция, натрия из основных минералов кристаллических пород (биотита, полевых шпатов) в кислый водный раствор с остаточным кремнеземом в виде кварца (тв – конечный) идет по следующим реакциям, представленным в табл. 5. Из нее видно, что после кислотного выщелачивания минералы гранитоидов сохраняются в виде твердого остатка – гранитного кварца и остаточного кремнезема от полевых шпатов, которые составят примерно 70–80 % массы исходной породы, в том числе остаточного кремнезема – 35–45 %. При кислотном выщелачивании значительно уменьшается масса исходных минералов, %: аортита – на 34, ортоклаза – на 24 и альбита – на 19.

И, соответственно, увеличивается их пористость или уменьшается объем минералов при уплотнении. Остаточный кремнеземистый материал может деформироваться, уплотняться и превращаться в тонкозернистый кварцевый агрегат или "блочный" кварц, как псевдоморфоза по выщелоченному полевому шпату, которая изменяется при диагенезе, катагенезе и метаморфизме. Эти псевдоморфозы проявляются в виде неравномернозернистого кварцевого жильного агрегата в риолите, выделяются в виде цемента в кварцito-песчанике, либо в виде псаммитовых обломков со сложной внутренней структурой (рис. 1, а–к). Порфировые выделения в риолитах фиксируются по мелким чешуйкам Прф и Му, которые вместе со вторичным тонкозернистым кварцем сохраняют контуры порфирового выделения в виде ромбовидной псевдоморфозы по порфировому выделению плагиоклаза в риолите. Кислотное выщелачивание катионов из полевых шпатов начинается с наростания Прф или Му по трещинам спайности в плагиоклазах, а прямоугольно-блочная структура кварца может рассматриваться как реликтовая, которая сохраняется после выщелачивания катионов из полевых шпатов. Одним из доказательств образования зерен кварца с ориентированно-деформированной структурой в результате кислотного выщелачивания катионов из полевых шпатов или вулканитов служит параллельность их ориентированных текстур. Эта ориентировка видимо появляется у них при направленных метаморфических деформациях рыхлых кремнеземистых остатков после кислотного выщелачивания катионов из минералов кристаллических пород. Эти зерна кварца с агрегатно-ориентированной структурой резко отличаются от однородных зерен "гранитного" кварца. Описанные структуры кварцевых агрегатов – одно из доказательств образования кварцito-песчаников овручской серии вследствие выщелачивания катионов из силикатов кислой водой нижнерифейских морей.

Реакции выщелачивания и осаждения железа зависят от pH и окислительных условий. При восстановительных условиях, характерных для литогенеза на значительной морской глубине, например, при образовании алеврито-глинистых осадков, железо устойчиво в двухвалентной форме, однако, при сильно окислительных условиях в близповерхностных водах железо окисляется до трехвалентного по реакции 1 (табл. 6) и осаждается в виде гетита или гематита, поскольку поле последних при уменьшении pH расширяется с увеличением Eh (рис. 6).

Равновесие $\text{Fe}^{2+}(\text{в})$ и гематита для реакции 1 (табл. 6) рассчитано для разных pH, Eh и PO_2 по формулам 2–4 [10]. Для $\lg[\text{Fe}^{2+}] = -1$ (в эксперименте по выщелачиванию катионов

концентрация железа в растворе составляет 2800 мг/л по данным атомно-абсорбционного анализа) и при pH = 0,15 получено Eh = +0,76 в, а для $\lg[\text{Fe}^{2+}](\text{в}) = -2$ и pH = 0,15 получено Eh = +0,82 В (рис. 6). Высокое Eh при литогенезе кварцита-песчаников подтверждается наличием в отдельных прослоях оксидов трехвалентного марганца, для которых нужно при тех же pH значительно более высокое Eh, например, при pH = 0–4 равновесное Eh более +1,5 В [10, 15].

Темные кварцito-песчаники на этапе литогенеза отлагались при Eh = +0,4 В и pH около 3. Это объясняет наличие в их составе ассоциации гематита с мусковитом. Для сланцев вероятны более восстановительные и щелочные условия осадконакопления их первичных эквивалентов, такие как для обычных фанерозойских алевро-глинистых осадков: Eh – от 0,0 до +0,1 В и pH – 4–6 (рис. 6).

О геолого-геохимической модели литогенеза пород овручской серии. На основании изложенных выше данных о петрографии, петрохимии, статистического анализа и экспериментов выстраивается новая геохимическая модель литогенеза пород овручской серии в риффе.

Суть ее в следующем: вода рифейских морей была кислой [3] и выщелачивала катионы из песчаных мелководных осадков – преимущественно продуктов разрушения гранитоидов суши. В среднем рифе уже отлагались морские известняки, для чего необходим pH морской

Таблица 6. Условия равновесия реакции гематита и Fe^{2+} в водном растворе

Номер уравнения	Уравнение реакции	ΔG_{298} , кДж/моль	pH	Eh	$\lg[P_{O_2}]$	$\lg [Fe^{2+}]$	$\lg K_p$
1	$2Fe^{2+}(b) + 0,5O_2 + 2H_2O_{ж} = Fe_2O_3 + 4H^+(b)$	-84,1	0,15	+0,76 ; (+0,82)	-27,2 ; (-23,2)	-1 ; (-2)	15
2	$15,0 = -4pH - 2 \lg[Fe^{2+}] - 0,5 \lg[P_{O_2}]$		1,0	+0,492 ; (+0,433)	-34 ; (-23,2)	-1 ; (-2)	15
3a	$Eh = 0,728 - 0,059 \lg[Fe^{2+}] - 0,177 pH$		0,15	+0,76		-1	
4a	$Eh = 1,23 + 0,01475 \lg[P_{O_2}] - 0,059 pH$		0,15		-27,8	-1	

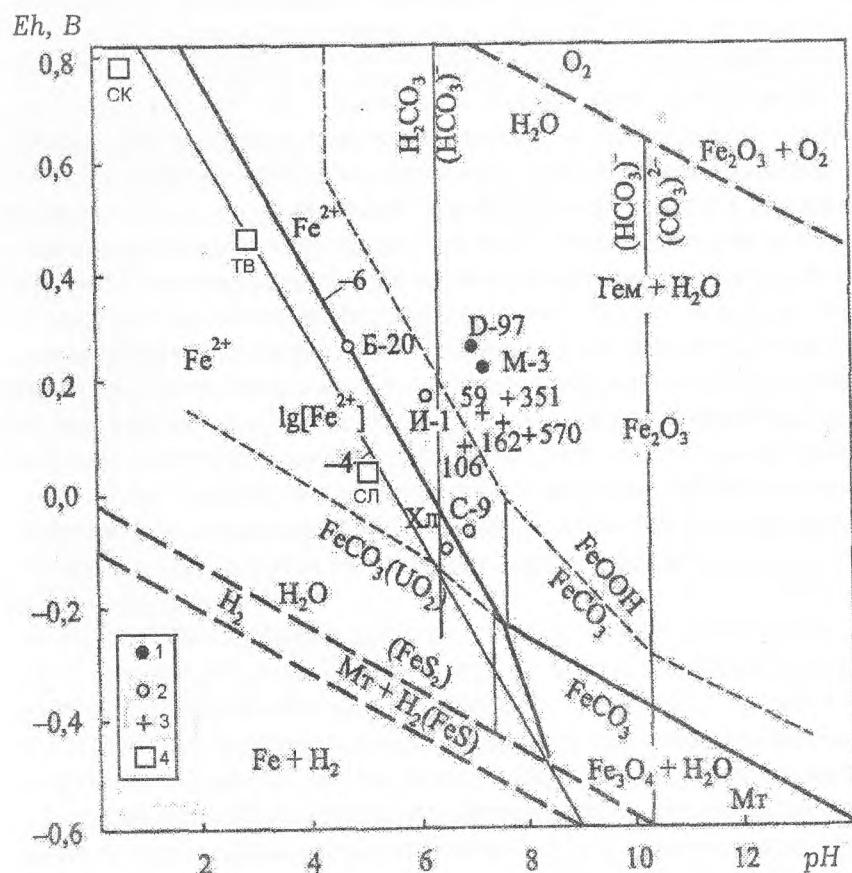


Рис. 6. Диаграмма Eh - pH литогенеза осадков овручской серии нижнего рифея. Основа [3] - диаграмма Eh - pH; 1 - лимонитовые прожилки в гранитах; 2 - почвы и растения (Б-20, - подзолистая, И-1 - чернозем, С-9 - торф, Хл - хлорофилл, В - подзолистая лесная почва, участок Вересня [5]); 3 - пористая вода в гранитах, скв. 1, глубина, м, 4 - породы овручских кварцито-песчаников рифея: СК - светлые кварцито-песчаники, ТВ - темные кварцито-песчаники, СЛ - мусковитовые сланцы

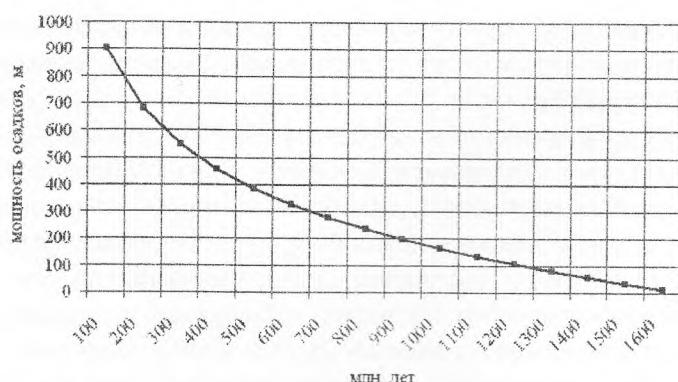


Рис. 7. Зависимость максимальной мощности осадочных пород (в метрах за 1 млн лет) от их возраста (в млн лет)

образования рифейских кварцito-песчаников. Как показано выше (с учетом данных [20]), для отложения кварцito-песчаников необходимо затратить $(20-30) \cdot 10^{18}$ кг НС1, а при $\text{pH} = 1,0$ вода океана содержала 0,35 % НС1, т. е. было растворено не более $5 \cdot 10^{18}$ кг, что в 4–6 раз меньше, чем необходимо для образования рифейских кварцito-песчаников. Это свидетельствует о том, что pH воды рифейского океана составлял не менее 0,15.

Кинетику рифейского литогенеза точнее можно оценить по кислотному выщелачиванию морской водой натрия из кристаллических пород, которое происходит медленнее выщелачивания других катионов.

Можно вычислить время, необходимое для выщелачивания натрия из гнейсов по формуле химической кинетики [17]:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

где N – количество оставшегося натрия в породе к моменту времени t (в % от всего натрия в породе), N_0 – исходное количество натрия (принято за 100 %), λ – постоянная выщелачивания, $1/\lambda$ – время выщелачивания одного % натрия, t – время в годах.

После 80 дней (или 0,22 года) выщелачивание катионов из гнейсов (пр. Гн-1, Гн-2) при начальном $\text{pH} = 0,15$ в раствор (X_{Na}^p) составляет 22 мг/л натрия, т.е. было выщелочено 0,0073 % (X_{Na} %) от всего натрия в породе. По уравнению (2) для гнейсов ($\text{pH} = 0,15$) $\lambda = 3,327 \cdot 10^{-4}$ % в год, а время полного выщелачивания натрия из породы составляет $t_{\text{полн}} = 14000$ лет. Для $\text{pH} = 1,0$ (обр. Гн-3) получены такие данные: $X_{Na}^p = 13$ мг/л, $X_{Na}^p = 0,0043$ %, $\lambda = 2,0^{-4}$ % в год, а $t_{\text{полн}} = 23000$ лет.

Результаты экспериментов по выщелачиванию натрия из гранитов при $\text{pH} = 0,15$ за 80 дней (пр. Гр-1, Гр-2) таковы: $X_{Na}^p = 54$ мг/л, $X_{Na}^p = 0,018$ %, $\lambda = 8,174 \cdot 10^{-4}$ % в год, а $t_{\text{полн}} = 6000$ лет. Для $\text{pH} = 1,0$ (обр. Гр-3) получены такие данные: $X_{Na}^p = 21$ мг/л, $X_{Na}^p = 0,007$ %, $\lambda = 3,17 \cdot 10^{-4}$ % в год, а $t_{\text{полн}} = 15000$ лет.

Быстрее всего выщелачивается натрий из габбро и лабрадоритов: $t_{\text{полн}} = 1500$ лет.

Как известно, осадконакопление в геологической истории Земли является нарастающим процессом и связано с активизацией вертикальных колебательных тектонических движений блоков земной коры и с увеличением амплитуды этих движений [21]. Максимальная скорость осадконакопления увеличивается в течение фанерозоя от 400–500 м за 1 млн лет в нижнем палеозое до 1000 м/млн лет в мелу и до 1200–1700 м/млн лет в кайнозое [21, с. 530]. Снижение производительности осадконакопления с увеличением его возраста имеет сложный характер и может быть описано параболическими или логарифмическими моделями. По разным моделям максимальная скорость осадконакопления в нижнем рифея была небольшой и составляла менее 100 м мощности отложений (M) за 1 млн лет.

По логарифмической модели M так зависит от возраста отложений (t , млн лет):

$$M = 2376,8 - 320,4 \cdot \ln t \quad (3)$$

воды ~ 7–8. Прогноз времени на нейтрализацию кислой морской воды при осадконакоплении по данным экспериментов (рис. 4, 5) показывает, что при начальном $\text{pH} = 0,15$ для нейтрализации кислоты требуется (разрушение гнейсов и литогенез кварцевых песков) около 30 лет, а гранитов – около 200 лет. При начальном $\text{pH} = 1,0$ вода нейтрализуется гнейсами за 10 лет, а гранитами – за 20 лет. Хотя при $\text{pH} = 1,0$ кислоты в морской воде уже недостаточно для выщелачивания катионов из исходных пород и

показано выше (с учетом данных [20]), для

По этому уравнению (3) максимальная мощность нижнерифейских отложений возрастом 1300–1600 млн лет составляла 80–20 м за 1 млн лет, т. е. для отложения 1000 м кварцито-песчаниковых осадков овручской серии необходимо более 10–50 млн лет (рис. 7).

По этим данным осадконакопление на Земле начинается не ранее 1700 млн лет. Видимо, 1700 млн лет назад закончился плутонический этап геологической истории Земли (интрузией гранитов-рапакиви) и начался экзогенный этап ее истории [2, 3]. Начался он с образования значительных поднятий блоков континентальной коры на дне океана и первого появления суши в кислом океане, размыв пород которой привел к отложению первых осадочных пород на Земле – кварцито-песчаников нижнего рифея, в том числе и пород овручской серии. Однако скорости этих первых экзогенных процессов – поднятий суши, размыв их, отложение кварцевых песков выщелачивания и опускание дна под этими отложениями были небольшими – на порядок меньшими, нежели скорость осадконакопления в фанерозое, а особенно в мезо-кайнозое.

Продолжительность осадконакопления кварцевых песков овручской серии в нижнем рифее, учитывая колебательные движения дна при частом переслаивании с/з и м/з песков с темными кварцитами, алевритами и глинами, а также возможные перерывы в осадконакоплении, можно оценить в 200–300 млн лет.

Средне- и мелкозернистые пески осаждаются в море на глубине 20–50 м [21] они постоянно взмучиваются на глубину около одного метра и химически взаимодействуют с морской водой. Алевриты осаждаются на глубине 50–70 м, а глины – на еще большей глубине. Частицы алевро-глинистых отложений слипаются и поэтому слабо химически взаимодействуют с морской водой. Осадочные породы овручской серии общей мощностью около 1000 м состоят на 90–95 % из кварцито-песчаников, которые содержат около 200 маломощных прослоев сланцев [24], образованных по первичным алеврито-глинистым осадкам. Для отложения глинистых осадков необходимо погружение дна прогиба не менее чем на 50–100 м. Поэтому на колебательные движения одного цикла, начиная с отложения песков, затем на погружение дна осадочного прогиба при отложении алевро-глинистых осадков и обратное поднятие дна до глубин осаждения нового слоя песков необходимо затратить не менее 1 млн лет при сохранении одинаковой скорости этих движений. Таким образом, при отложении осадков овручской серии (кварцевых песков и 200 прослоев алеврито-глин) необходимо затратить не менее 200 млн лет. Этих прослоев намного больше, учитывая частые колебания земной коры. Например, образование тонких прослоев темных минералов в светлых кварцах (рис. 1, n). Надо отметить, что конседиментационные тектонические движения в рифее были спокойнее, чем в фанерозое, и имели небольшую скорость. По практическому отсутствию грубообломочных отложений можно предполагать и небольшую высоту размываемой в рифее суши, а также и небольшие градиенты атмосферного давления и ровный климат с небольшой скоростью ветра.

Можно также предположить, что в нижнем рифее, сразу после завершения высокотемпературных процессов плутонического гранитного магматизма в земной коре, океаническая вода была не только кислой, но и теплой, возможно даже горячей – до 50–70 °C. Точнее пока оценить трудно. Скорость минералообразующих процессов при такой температуре несколько выше, чем при нормальных условиях (25 °C), – примерно в 1,5–2 раза.

Выводы. 1. На основании минералого-петрографических, геохимических и экспериментальных исследований пород овручской серии Украинского щита, статистической обработки, термодинамического и кинетического анализа данных сделаны выводы о том, что кремнисто-кварцевые пески нижнего рифея, как первичные эквиваленты кварцито-песчаников овручской серии, образовались в результате выщелачивания катионов из кристаллических пород кислой водой нижнерифейских морей. Вначале осадконакопления (примерно с 1600 млн лет назад) pH этой морской воды составляет около 0,15, а уже в среднем рифее (1200–1000 млн лет назад) pH в результате нейтрализации кислоты катионами поднялся до 7–8, что сделало возможным отложение известняков. Для кварцито-песчаников характерен гематит, что соответствует окислительной обстановке литогенеза с Eh около + 0,8 В.

2. Во всем мире нижнерифейские отложения представлены преимущественно кварцито-песчаниками [11]. Это свидетельствует о том, что условия их формирования были одинаковыми и кварцито-песчаники могут служить стратиграфическими реперами нижнего рифея (1600–1300 млн лет). На Украинском щите нижнерифейскими являются кварцито-песчаники толкачевской, белокоровичской и пугачевской свит. Эти породы были первыми и самыми древними морскими осадками на Земле, образовавшимися при размыве первой суши, представленной поднятиями гранитоидной континентальной земной коры.

3. Скорость отложения осадков овручской серии была небольшой в связи с низкой активностью вертикальных тектонических движений блоков земной коры, в том числе поднятия суши и прогибания дна бассейнов осадконакопления. Продолжительность осадконакопления кварцевых песков овручской серии в нижнем рифее, учитывая колебательные движения дна при частом переслаивании с/з и м/з песков с темными кварцитами, алевритами и глинами, а также возможные перерывы в осадконакоплении, можно оценить в 200–300 млн лет.

4. Физико-химические условия отложения осадков в нижнем рифее характеризовались в целом уменьшением со временем кислотности, окисленности и температуры морской воды. Преобладающие светлые кварцевые пески отлагались на малых глубинах при максимальной кислотности и окислительной обстановке с осаждением гетита. Темные пески осаждались на несколько большей глубине и при меньшей кислотности, но при высоком Eh. Алевриты и алеврито-глинистые породы (эквиваленты сланцев) отлагались на значительной глубине (более 50–100 м) при небольшой кислотности и восстановительных условиях.

5. Отложение кварцевых песков нижнего рифея – первичных эквивалентов кварцито-песчаников овручской серии, а также аналогичных пород на всех континентах, характеризуют решительный поворот в геологической истории Земли (в связи с уменьшением внутренней энергии Земли и охлаждением земной коры) – от развивающихся эндогенных процессов в раннем докембрии (архее и раннем протерозое) к преобладанию самопроизвольных экзогенных процессов, прежде всего осадконакопления. Рифейские кварцевые пески, сопровождающие их алевриты и глинистые осадки – теперешние кварцито-песчаники, пирофиллитовые алевролитовые сланцы и мусковитовые алевролито-глинистые сланцы были первыми осадочными породами на Земле, поскольку в раннем докембрии континентальная кора была покрыта сплошным океаном, вода которого была сильно кислой (рН около 0,15). Рифейские кварцевые пески образовались при размыве первой суши, которая была сложена раннедокембрийскими гранитоидами, а также подстилающими овручскую серию нижнерифейскими збраньковскими вулканитами.

6. В нижнем рифее из размываемых гранитоидов, габброидов и вулканитов кислыми морскими водами вымывались практически все катионы – магний, кальций, железо, натрий, калий, алюминий, а в осадках сохранялся преимущественно кремнезем с небольшой добавкой гидрооксидов алюминия, железа и марганца (в виде гиббита, каолинита, гетита, вада). Тонкие алевро-пелитовые осадки, составляющие около 5 % объема пород овручской серии, обогащены глиноземом, оксидами железа и калием (мусковитовые сланцы). Среди овручских отложений преобладали мелкозернистые пески, при литогенезе которых поверхность реакционного взаимодействия псаммитовых обломков с морской водой весьма значительна. Для нижнерифейских осадков эта поверхность примерно в миллион раз превышает площадь поверхности Земли.

7. В раннедокембрийских породах и осадках овручской серии практически нет органического углерода, что объясняется высокой кислотностью воды раннедокембрийского океана. Поэтому живых организмов в кислых морях раннего докембра и нижнего рифея не могло быть. Только начиная со среднего рифея создались условия для возникновения и развития жизни на Земле. Это обосновывается также появлением только с рифея сульфатной серы, которая обогащена тяжелым изотопом – ^{34}S [20].

8. Наличие окисленной кислородной атмосферы и отсутствие жизни в сильно кислой воде нижнерифейских морей свидетельствуют о том, что свободный кислород появился в земной атмосфере еще до рифея и abiогенным путем.

9. Толща кварцито-песчаников на Овручской возвышенности является благоприятной средой для изоляции радиоактивных отходов. Высота водоразделов над уровнем моря составляет на Овручском поднятии 170–280 м, а врезы рек – 120–140 м. Превышение водоразделов над врезами рек на Овручском поднятии – 30–140 м, т. е. водоразделы резко подняты над врезами рек и имеют мощную зону аэрации в 20–100 м. Зона аэрации кварцитов на водоразделах может использоваться как временное хранилище для низко- и среднеактивных РАО и ОЯТ. Для глубинного хранилища долгоживущих РАО благоприятной средой изоляции будут кварциты на водоразделах, как тектонически стабильные, химически и радиационно устойчивые, а также слабо проникаемые породы кристаллического фундамента на глубине более 300–500 м от дневной поверхности.

1. Белевцев Р.Я., Дудко В.С., Сливак С.Д. и др. Коростенский pluton – петрогенезис, перспектива руноносности, проблемы изоляции радиоактивных отходов // Минерал. журн. – 1996. – 18, № 6. – С. 30–34.
2. Белевцев Р.Я., Бухарев С.В., Коломиец Г.Д. Концепция plutонического формирования континентальной земной коры Украинского щита // Минерал. журн. – 2000. – 22, № 2/3. – С. 118–131.
3. Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Сливак С.Д. и др. Термодинамика газового обмена в окружающей среде / Под ред. Р.Я. Белевцева. – К. : Наук. думка, 2007. – 248 с.
4. Белевцев Р.Я. Термодинамика и генетическая эволюция докембрийских гранитоидов Украинского щита // Эволюция докембрийских гранитоидов и связанных с ними полезных ископаемых в связи с энергетикой Земли и этапами ее тектономагматической активизации : Зб. наук. пр. УкрДГРІ – К., 2008. – С. 35–46.
5. Белевцев Р.Я., Сливак С.Д., Николаенко В.И. и др. Поиски стабильных блоков фундамента по геохимическим ореолам рассеяния в платформенном чахле для эколого-безопасной изоляции долгоживущих отходов (на примере Коростенского plutona) // Зб. наук. статей V Міжнар. наук.-практ. конф. "Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення". – Алушта, 2009. – т. 1. – С. 8–16.
6. Бесталько Н.А. Геологическое положение Белокоровичской структуры // Геол. журн. – 1986. – 46, № 3. – С. 25–32.
7. Богацкая И.В., Дранник А.С. Збраниковская осадочно-вулканогенная формация // Петрография докембрая Русской платформы. – К. : Наук. думка, 1970. – С. 242–245.
8. Бухарев В.П. Эволюция докембрийского магматизма западной части Украинского щита. – К. : Наук. думка, 1992. – 152 с.
9. Верхогляд В.М. Возрастные этапы магматизма Коростенского plutona // Геохимия и рудообразование. – 1995. – Вып. 21. – С. 34–47.
10. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М. : Мир, 1968. – 368 с.
11. Келлер Б.М., Семихатов М.А., Чумаков Н.М. Типовые разрезы верхней эратемы протерозоя // Геология докембрая : 27 Междунар. геол. конгресс : доклады. – М., 1984 – С. 56–76.
12. Личак И.Л. Петрология Коростенского plutona. – К. : Наук. думка, 1983. – 246 с.
13. Лобач-Жученко С.Б., Егорова Ю.С., Юрченко А.В. и др. Биотит-гранатовые гнейсы – результат структурно-метаморфической переработки древних тоналитов: состав минералов, характеристика и возраст процесса (Васильковский участок Орехово-Павлоградской шовной зоны) // Мінерал. журн. – 2009. – 31, № 1. – С. 3–10.
14. Мархинин Е.К. Вулканизм. – М. : Недра, 1985. – 288 с.
15. Мейсон Б. Основы геохимии. – М. : Недра, 1971. – 311 с.
16. Михницкая Т.П. Метаосадочные породы грабен-синклиналей Украинского щита. – К. : Наук. думка, 1993. – 110 с.
17. Полинг Л. Общая химия. – М. : Мир, 1974. – 846 с.
18. Пригожин И., Стенгерс. Порядок из хаоса. – М. : Прогресс, 1986. – 431 с.
19. Рифей и венд Европейского севера СССР / Гецен В.Г., Дедеев В.А., Акимова Г.Н. и др. – Сыктывкар, 1987. – 124 с.
20. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдасов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. – М. : Наука, 1990. – 182 с.
21. Рухин Л.Б. Основы литологии. – Л.-М. : Гостоптехиздат, 1953. – 671 с.
22. Скобелев В.М. Петрохимия и геохронология докембрийских образований Северо-Западного района Украинского щита. – К. : Наук. думка, 1987. – 138 с.
23. Соботович Е.В., Белевцев Р.Я. Ядерна енергетика і наслідки Чорнобильської катастрофи // Вісник НАН України. – 2009. – № 4. – С. 29–39.

24. Таранова Л.А. К методике описания глубоких структурных скважин на примере глубокой скважины № 5006 на Овручской возвышенности // Петрография докембрия Русской платформы. – К. : Наук. думка, 1970. – С. 432–437.
25. Фуртес В.В. Микрофитофоссилии из пород овручской серии северо-западной части Украинского щита // Геол. журн. – 1979. – № 6. – С. 127–133.
26. Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Соботович Э.В. и др. Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения). – НИЦРЭПИ НАН Украины. – К., 2006. – 398 с.
27. Шумлянский Л.Д., Богданова С.В. U-Pb вік цирконів та геохімічні особливості ріолітів Овруцької западини, Північно-Західний район Українського щита // Мінерал. журн. – 2009. – 31, № 1. – С. 40–49.
28. Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. – Львов : ЗУКЦ, 2005. – 364 с.

РЕЗЮМЕ. В статті викладені результати мінералого-петрографічних, геохімічних та експериментальних досліджень кварцито-пісковиків овручської серії Українського щита, статистичної обробки, термодинамічного та кінетичного аналізу здобутих даних. Представлена геолого-геохімічна модель літогенезу цих порід, які були першими та самими давніми морськими осадовими породами на Землі (їх вік 1600–1300 млн років), які відкладалися при розчині першої суші – виступів гранітоїдної континентальної земної кори з вилугуванням катіонів з осадків кислою водою нижнєріфейських морей. Оцінені умови літогенезу кварцито-пісковиків – pH = 0,15 та Eh (блізько +0,8 в) морської води, їх зміни в часі та з глибиною моря, а також швидкість кислотного вилугування і осадконакопичення. Формування кварцито-пісковиків нижнього ріфею характеризує рішучий поворот в геологічній історії Землі від розвиваючих ендогенних магматичних процесів в ранньому докембрі до переважання самовільних екзогенних процесів в ріфей-фанерозойські геологічні епохи в зв'язку зі зменшенням внутрішньої енергії Землі та охолодженням земної кори. Це привело до розростання суші, інтенсивного осадконакопичення, появи життя на Землі, і дозволяє також зробити висновок про те, що вільний кисень з'явився в земній атмосфері ще до ріфею абіогенным шляхом. Товща кварцито-пісковиків на Овручській височині є сприятливим середовищем для ізоляції радіоактивних відходів.

SUMMARY. In the article on the basis of mineralogical-petrographical, geochemical and experimental investigations of the Ovrutch quartzite-sandstones and thermodynamic, statistic analysis data is stated. Geological-geochemical model of lithogenesis of these rocks are presented. These rocks were very ancient sedimental rocks on the Earth, they have age 1600–1300 millions years, and when sour dissolution elements in water of the Late Proterozoic (Ripheus) sea from granite fragments during lithogenesis were formed. Physical-chemical condition of lithogenesis, speed of sour dissolution and of lithogenesis are determined. Formation of quartzite-sandstones in the Late Proterozoic (Ripheus) characterize decisive change in geological history of the Earth from endogenous magmatic processes in the Early Procambrian for exogenous processes in the Early Proterozoic and the Phanerozoic. In the Early Proterozoic appear free atmospheric oxygen and life on the Earth were appeared. The Ovrutch quartzite-sandstones are perspective environment for storehouse of radioactive waste.