

Петрофизический аспект оценки пригодности горных пород при выборе геологических хранилищ радиоактивных отходов

© М. И. Толстой¹, В. М. Шестопапов², Л. И. Кузив², 2011

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

² Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 30 июня 2010 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Розглянуто петрофізичний аспект досліджень кристалічних гірських порід з метою оцінки їх придатності для створення геологічних сховищ радіоактивних відходів. Наведено приклад геолого-петрофізичної і палеогеодинамічної оцінки петротипів коростенського комплексу Волинського мегаблока Українського щита для системи геологічного сховища.

Petrophysical aspect of the research of the host rock for the assessment their suitability for the radio waste disposal are discussed here. The example of the geology-petrophysics and paleogeodynamic assessment of the petrotypes of korostenskyi complex of the Volyn region of the Ukrainian Shield for deep repository of radio waste is shown in this paper.

Вступление. Проблема изоляции и захоронения радиоактивных отходов (РАО) существует со времени открытия радиоактивных веществ и приобрела исключительное значение и актуальность в связи с их использованием в качестве энергетического топлива за счет энергии распада элементов уранового ряда.

Эта проблема была озвучена на международной конференции по мирному использованию атомной энергии еще в 1955 г. в Женеве, доклады которой по изучению миграции радиоактивных веществ в различных средах — в сверхглубоких скважинах, шахтах и даже в Мариинской впадине, были опубликованы [Международная ..., 1956]. При обсуждении докладов был сделан вывод, что в условиях верхней части земной коры, а возможно, и всей Земли, которая переживала и переживает постоянные изменения в составе и строении, надежно и долгосрочно хранить радиоактивные вещества с большим периодом полураспада, соизмеримым с возрастом планеты, практически маловероятно. Поступило

даже предложение отправлять РАО на Солнце, как наиболее надежный и безопасный способ их изоляции, что очевидно нереально. Поиски приемлемого решения проблемы продолжались и продолжают постоянно. Было выяснено, что ее решение только путем захоронения РАО на глубине невозможно.

Современное обобщение международного опыта в этой области было предложено МАГАТЕ в виде рекомендаций по использованию геологических хранилищ для захоронения РАО. Под такими хранилищами понимают [Шестопапов и др., 2006] сооружения для захоронения РАО, расположенные под землей (как правило, на глубине нескольких сотен метров) в стабильных вмещающих породах и предназначенные для обеспечения долгосрочной изоляции РАО от окружающей среды. В качестве вмещающих пород предлагались кристаллические породы, эффузивы, соляные и глиняные отложения и др.

Геологическое хранилище должно объединять в себе целую систему как инженерных,

так и природных слагаемых. Первые должны решаться методами инженерных и горных наук, вторые — методами изучения природной среды — геологическими, гидрогеологическими, физико-механическими, петрофизическими, петрогеохимическими и др. Только при их объединении и комплексном анализе возможно найти необходимое решение.

Необходимо было создать единую систему поведения с РАО. Важным элементом этой системы является изоляция наиболее опасных и долгоживущих РАО в глубоко размещенных стабильных геологических образованиях.

1. Первые шаги в данном направлении в Украине были сделаны в 1993 г., когда под руководством акад. НАН Украины Э.В. Соботовича началась разработка первой концепции по поведению с РАО [Холоша, Соботович, 1994]. Был проведен анализ отдельных перспективных регионов и геологических формаций для изоляции РАО, выполнены предварительные оценки по результатам предварительного отбора перспективных участков в кристаллических породах северной части Коростенского плутона [Белевцев и др., 1996]. В 1995 г. был разработан и утвержден Верховной Радой Украины закон "О поведении с радиоактивными отходами" и другие законы [Законы Украины, 1995, 1998, 2000]. В итоге, согласно закону, ответственным за изоляцию высокоактивных и долгосрочных РАО в недрах было назначено Министерство чрезвычайных ситуаций (МЧС) Украины, которое выступало основным разработчиком "Государственной программы по поведению с радиоактивными отходами" и "Комплексной программы по поведению с радиоактивным и отходами" [20 лет ..., 2006].

В 1997—2000 гг. МЧС привлекает специалистов НАН Украины (акад. В. М. Шестопалов и др.), ПО "Пивничгеология" (М. М. Грищенко, Л. М. Шимкив и др.) и других организаций для проведения региональных работ в пределах Коростенского плутона и Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО). Были выполнены оценка геодинамического состояния и современной активности территории ЧЗО, комплексное геофизическое, гидрогеологическое и тектоническое изучение участков, перспективных для подземной изоляции РАО.

В настоящей статье рассмотрена оценка факторов, связанных с исследованием природной среды, в том числе физико-механических, петрофизических и частично петрогеохимичес-

ких, с целью обоснования пригодности пород (в частности кристаллических) для создания геологических хранилищ РАО.

Проблема организации и создания геологических хранилищ РАО довольно многогранна и охватывает большой круг вопросов. К ним относятся: выбор пригодных площадок, их благоприятное геологическое строение, геодинамический режим, конструкция хранилища, тип и характер контейнеров, их защита и др. При выборе хранилищ РАО довольно длительного использования, к которым относятся РАО АЭС, возникает необходимость учета физических и петрохимических особенностей пород окружающей среды, что объясняется особенностью радиоактивных элементов с большим периодом полураспада, в первую очередь U^{238} , U^{235} , Th^{232} , их продуктов распада. Важное значение при этом имеют физическая и химическая формы радиоактивных элементов. Из физических особенностей радиоактивных элементов следует выделить тип радиоактивности, особенность радиоактивного распада, энергетические характеристики их излучения, в том числе теплового. Поскольку радиоактивные элементы взаимодействуют с окружающей средой, передавая породам, минералам, молекулам и атомам определенную часть энергии, то в зависимости от природы радиоактивного излучения они характеризуются ионизирующей способностью, которая может быть высокой для α -частиц и меньшей для γ -излучения. Соответственно проявляются эффекты взаимодействия: на меньшем расстоянии от источника излучения — для первого типа излучения, на большем — для второго. Расстояние этого взаимодействия может существенно увеличиться, если миграция радиоактивного вещества в породах и водах происходит вследствие повышения их проницаемости, изменения состава и особенностей взаимодействий между ними. Характер таких взаимодействий, в свою очередь, зависит от других факторов, в частности химических. В этом отношении среди РАО АЭС наибольшего внимания заслуживают уран, радий, радон и продукты их распада. Химически уран (U) относится к 6-й группе таблицы Менделеева и имеет шесть валентных электронов, которые расположены на разных электронных орбитах, что обуславливает его отличительные степени окисления и способность принимать участие в окислительно-восстановительных реакциях. В природных условиях уран встречается в 4- и 6-валентных соеди-

нениях. Первые характерны для восстановительных сред и преимущественно глубинных слоев земной коры, вторые — для окислительных, главным образом, поверхностных гипергенных. В связи с этим характерной особенностью урановых соединений является способность изменять свою валентность при изменении окислительно-восстановительного потенциала среды. Кроме того, уран может создавать легкоподвижные соединения с галогенами (F, Cl, J). Поэтому соединения урана имеют высокую миграционную способность в различных природных условиях, а вследствие большого периода полураспада и растворимости могут мигрировать на значительные расстояния.

Высокой радиоактивностью и относительно большим периодом полураспада отличаются также радий (Ra) и его продукт полураспада радон (Rn) — химически инертный радиоактивный газ. Радий относится ко второй группе таблицы Менделеева, является аналогом щелочноземельных элементов и характеризуется основными свойствами. В рассеянном состоянии в природных средах он путем выщелачивания вместе с радоном может накапливаться и мигрировать в природных водах. Этот процесс следует считать основным фактором миграции урана, радия и радона в горных породах зоны гипергенезиса, особенно при контрастных рН-условиях. На интенсивность растворимости урана и радия, распределение радона между жидкой и газообразной фазами, а также на их перенос существенно влияет температура — один из неотъемлемых факторов распада урана и его продуктов. При этом интенсивность перехода в раствор составляющих урана и радия с повышением температуры увеличивается в кислой среде, т. е. в зоне гипергенезиса [Евсеева, Перельман, 1962]. Таким образом, радиоактивные материалы могут мигрировать в разной фазовой форме — жидкой или газообразной, и с ионизирующим и тепловым излучением.

При оценке безопасности хранилища РАО кроме приведенных особенностей веществ необходимо учитывать особенности состава, состояние и физические свойства вмещающих пород. Этому вопросу, учитывая их разнообразие, изменчивость изолирующих функций, следует уделять значительное внимание. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, в качестве природной среды для захоронения РАО были признаны кристаллические поро-

ды, в частности, гранитоиды в силу их достаточно широкого распространения в пределах тектонически стабильных кристаллических массивов и физико-химических качеств. Среди последних следует отметить благоприятный для РАО химический состав, а также физико-механические и петрофизические особенности гранитоидов. Благоприятность химического состава этих пород обуславливается химически нейтральным и преимущественно кремнекислородным и алюмосиликатным типами породобразующих минералов. Это отвечает химическому состоянию слагаемых урана и тория — наиболее долгоживущих радиоактивных элементов — и не создает между ними реакционного состояния и химических взаимодействий (за исключением влияния на породы наложенных, особенно локализованных физико-химических процессов вторичного происхождения). Очень важным, а нередко и определяющим при выборе объектов для захоронения РАО является их соответствие требованиям пригодности по физико-механическим и петрофизическим особенностям.

Под физико-механическими свойствами горных пород понимаются свойства, которые определяют их физическое состояние, т. е. отношение к воде, и закономерности изменения прочности и деформируемости [Дортман, 1964]. Исследования указанных факторов имеют не только инженерное, но и геологическое значение [Ломтадзе, 1972]. По своему назначению физико-механические исследования могут быть разделены на физико-технические и собственно физико-механические. Первые относятся к инженерным наукам и главным образом используются в строительстве и его геологическом обслуживании. Вторые тесно связаны с петрофизическим изучением физических и физико-химических свойств горных пород и их изменения под влиянием природных и техногенных процессов. Объединяют эти исследования в основном методы изучения физических свойств — плотности, пористости, упругих характеристик, оценок пластичности, слоистости, трещиноватости, зернистости, т. е. оценок, преимущественно зависящих от структурно-текстурных особенностей пород, а также объект исследований — горные породы. На этом основании указанные методы могут быть отнесены к петрофизическим. Отличает их в основном сфера приложения и полнота используемых характеристик пород. Физико-механические методы, особенно физико-

технические, применяются главным образом при решении конкретных инженерно-технических задач и их прогнозировании, тогда как петрофизические методы, использующие кроме "структурно-текстурных" характеристик оценки, зависящие от состава пород (электрофизические, теплофизические, радиоактивные, магнитные, физико-химические и др.), — практически во всех науках о Земле (петрогеологии, петрографии, гидрогеологии, геофизике, тектонике, планетологии, космологии и др.).

Для обоснования выбора геологического хранилища РАО и его реализации используются методы из различных направлений науки и техники, в том числе физико-механические и петрофизические. Однако их назначение и прогнозные возможности до определенной степени различаются. Первые главным образом решают задачу конкретного выбора участка, пригодного для захоронения контейнеров РАО, их безопасного хранения в пределах относительно ограниченного времени и пространства. Для этого используют методы решения инженерно-физических задач, которые связаны с оценкой местности, макропроницаемости и др. Собственно петрофизические исследования должны обеспечивать достаточно большой отрезок времени для использования захоронения, учитывать особенности миграции урана и его продуктов распада, а также возможные региональные изменения состава и строения пород хранилища, в том числе вследствие вторичных процессов, отраженных динамических явлений, глубинных процессов, с учетом исторического характера их проявлений, палео- и геодинамических признаков.

Оценка перспективности пород для изоляции РАО должна включать также следующую геологическую информацию [Шестопалов и др., 2006; Холоша, Собонович, 1994; Лаверов и др., 1994]:

- объем пород площадки с необходимыми свойствами;
- характер проницаемости пород;
- сорбирующие и дисперсионные свойства пород;
- наличие системы геохимических барьеров для радионуклидов, которые могут мигрировать в массиве пород;
- содержание воды в породах;
- стабильность геологического массива в геологическом времени и несклонность к изменениям под воздействием эндогенных

и экзогенных явлений.

Эти геологические данные важны не сами по себе, а в той мере, в которой они позволяют оценить пригодность пород с целью организации хранилища РАО. Для этого необходимы также оценки физико-химических и петрофизических свойств пород.

Все физические, физико-механические, химические характеристики пород взаимосвязаны и взаимодействуют между собой. Среди них: однородность, массивность, отсутствие вторичных изменений, минимальная и однородная слоистость, анизотропия, пористость. Это одни из наиболее значимых характеристик при выборе объектов для захоронения РАО. Особое значение как ведущего показателя пригодности пород имеет их проницаемость. Она характеризует способность пород пропускать сквозь себя вещество в твердом, жидком или газообразном состоянии, а также энергетические проявления, сопровождающие радиоактивный распад, в виде жидкости, радиоактивного излучения, тепла, электромагнитных полей.

В основе определения сроков "проницаемости" лежит интегрированная характеристика ряда показателей: состав породы, ее структура и текстура, набор физических характеристик. Основными факторами проницаемости следует считать структурно-текстурные особенности самих пород, их состав, физические свойства, а также геологические условия их формирования и интенсивность проявлений эпигенетических процессов. Последние в значительной степени зависят от структурно-тектонических, в первую очередь геодинамических, условий образования пород, их термодинамических влияний: сжатий, растяжений, перемещений и др., которые отображаются в составе, структуре, физических свойствах породы — статических (плотность, минеральная плотность, намагниченность) и динамических (пористость, упругие характеристики, теплопроводность и др.). Их изучением занимаются соответствующие направления геологических исследований: палеомагнетизм, структурная геология, кристаллография и др. Благодаря этим исследованиям появилась возможность изучать соответствующие этапы истории формирования пород. В частности, в результате развития "динамического" направления петрофизических исследований [Толстой, Гожик, 2007] появилась возможность существенно расширить и углубить круг вопросов, связанных с изучением

палеогеодинамических условий формирования пород, прежде всего в связи с комплексным изучением "структурно чувствительных" палеогеодинамических классификаций, в частности, гранитоидных пород [Толстой и др., 2007].

2. В качестве примера такого использования комплексного геолого-петрофизического анализа для выбора пригодных петротипов с целью создания геологических хранилищ РАО ниже приводятся результаты соответствующих исследований коростенского комплекса, выполненных в пределах Волынского мегаблока Украинского щита, как одного из наиболее близко расположенного к территории ЧАЭС [Холоша, Соботович, 1994; Белевцев и др., 1996].

Комплексный петрофизический и палеогеодинамический анализ петротипов позволил установить ряд характерных для них особенностей формирования (табл. 1).

Граниты и граниты рапакиви коростенского комплекса характеризуются достаточно широким диапазоном глубинности образований — от очень малой (гранит остриевский, игнатпольский, норинский, рассоховский, емельяновский) до большой (гранит лизниковский). Существенное доминирование режима сжатия или растяжения при формировании этих пород отсутствует (хотя и отмечается некоторое преобладание неоднородного сжатия над другими режимами уплотнения). В то же время, если рассматривать Волынский мегаблок в целом, то режим сжатия (односторонний или эпизодически квазивсесторонний и неоднородный) доминировал, как и в Ингульском мегаблоке, а режим растяжения — в Приазовском и Среднеприднепровском мегаблоках [Петрогеохімія ..., 2003]. В породах коростенского комплекса преобладал сингенетический тип деформации, хотя эпигенетический тоже имел место (граниты норинский и емельяновский).

Исходя из данных табл. 1, можно отметить достаточно близкие геодинамические условия формирования большинства петротипов, которые усложнены в некоторой мере характером их проявлений, главным образом за счет тектонических режимов, структурных особенностей и др. Сравнительный анализ данных позволяет считать более пригодными для выбора пород как вмещающих для РАО следующие петротипы: граниты лизниковские, игнатпольские, норинские, рассоховские, потиевские.

Дополнительную информацию по выбору петротипов можно получить и при рассмотрении особенностей петрохимического состава (табл. 2). Данные о химическом составе гранитоидов косвенно связаны с проницаемостью горных пород и являются свидетельством условий среды формирования пород (кислотных, щелочных и др.). Состав и геохимическая специализация кристаллических пород в целом и гранитоидов в частности определяются условиями их формирования, минеральным составом, изотопным составом и количеством элементов-примесей, характером изоморфных замещений в минералах, а также физическими особенностями пород [Дортман, 1964; Петрогеохімія ..., 2003]. Поскольку уран и продукты его распада относятся к группе литофильных, среди гранитоидных пород в качестве объектов для захоронения РАО желательно выбирать петротипы с аналогичным профилем геохимической специализации.

Гранитоиды коростенского комплекса имеют литофильно-халькофильный характер геохимической специализации. Согласно [Петрогеохімія ..., 2003; Петрографія ..., 2008], гранитоиды такого типа формировались на средних, малых и очень малых глубинах при высоком парциальном давлении кислорода, причем накопление литофильных элементов происходило в основном в условиях растяжения, чаще всего на средних и малых глубинах, а халькофильных элементов — в условиях квазивсестороннего и одностороннего сжатия с уменьшением уровня глубинности, по сравнению с исходными их разновидностями. В процессе формирования химического состава гранитоидов определяющим было влияние оксидов, таких как FeO, MgO, SiO₂, CaO, TiO₂. Последний при формировании плотности гранитов выполнял ведущую роль [Петрографія ..., 2008]. В целом в гранитах субщелочного и щелочного рядов минеральная плотность увеличивается с возрастанием степени окисления железа, в основном в ослабленных зонах, где преобладают восстановительные условия и формируются разуплотненные разновидности пород [Петрогеохімія ..., 2003].

Результаты палеогеодинамического анализа пригодности петротипов коростенского комплекса для выполнения системы захоронения в них дополняют его петрофизические характеристики и структурно-геологические особенности. Вместе с этими дополнениями такой анализ позволяет установить, что наименее проницаемыми среди ведущих петротипов грани-

Т а б л и ц а 1. Палеогеодинамический анализ петротипов коростенского комплекса Волинского мегаблока

Петротип	Структура	Текстура	Глубина формирования	Геодинамический режим	Тип деформации
Лезниковский	Гипидиоморфнозернистая, порфирибластовая среднезернистая	Массивная, полосчатая	Большая, очень малая	Линейная зона растяжения	Пластичная
Остриевский	Гипидиоморфнозернистая, на отдельных участках аллотриоморфнозернистая мелкозернистая	Массивная	Очень малая	То же	»
Игнатпольский	Порфирибластовая, пегматоидная, микрографическая, гипидиоморфнозернистая мелко-среднезернистая, среднезернистая	»	» »	Одностороннее сжатие	—
Норинский	Порфириовидная, преимущественно безовоидная средне-крупнозернистая	»	» »	Неодородное сжатие	Пластичная
Рассоховский	Порфирибластовая, пегматоидная, микрографическая, гипидиоморфнозернистая средне-крупнозернистая	»	Очень малая, малая	Растяжение	Хрупкая
Березовский	Порфириовидная, преимущественно безовоидная средне-крупнозернистая	»	—	—	—
Емельяновский	То же крупнозернистая	Массивная, преимущественно безовоидная	То же	Неодородное сжатие	Пластичная
Коростенский	Порфирибластовая, пегматоидная, микрографическая, гипидиоморфнозернистая мелко-среднезернистая, среднезернистая	Массивная	Небольшая, очень малая	Растяжение	Хрупкая
Рапакиви малинский	Гипидиоморфнозернистая, порфириовидная, пойкилитовая, овоидная средне-крупнозернистая	»	Средняя, очень малая	То же	»
Рапакиви потиевский	То же	»	Небольшая, малая	» »	»

Т а б л и ц а 2. Химический состав петрогипов коростенского комплекса (% массы)

Петрогип	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	Mg	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₃	H ₂ O
Остриевский	73,00	0,30	13,33	1,08	1,89	0,04	0,44	1,02	3,16	5,01	0,18	0,14
Лезниковский	76,15	0,08	11,64	1,21	1,60	0,02	0,27	0,78	3,13	4,72	0,04	0,07
Березовский	75,17	0,23	11,74	0,46	1,97	0,02	0,97	1,05	2,72	4,58	0,05	0,01
Емельяновский	75,39	0,19	11,99	0,33	1,97	0,02	0,63	1,09	2,85	4,53	0,05	0,01
Рассоховский	73,55	0,27	12,80	0,81	1,93	0,01	0,13	0,86	3,12	5,67	0,09	0,05
Рапакиви потиевский	69,18	0,37	14,72	1,33	2,67	0,04	0,34	1,88	3,12	5,31	0,08	0,09
Норинский	74,75	0,19	12,12	1,01	1,82	0,03	0,40	0,59	2,90	5,24	0,04	0,16
Коростенский	73,12	0,29	13,09	1,15	1,81	0,03	0,35	0,86	3,03	5,61	0,07	0,18
Рапакиви малинский	72,44	0,28	13,12	0,97	2,38	0,04	0,27	1,24	3,21	5,70	0,06	0,11
Игнатпольский	74,29	0,23	12,52	0,77	1,65	0,04	0,27	1,25	2,95	5,21	0,05	0,11

тоидов являются граниты рапакиви потиевские, малинские и рапакивиподобные игнатпольские.

Выводы. На основании представленного обзора особенностей организации геологических хранилищ РАО и с учетом роли петрофизического изучения горных пород для выбора и создания таких хранилищ можно сделать следующие выводы.

1. В условиях постоянно растущей энергетической потребности человечества актуальной остается проблема развития атомной энергетики и ядерно-промышленного комплекса, что требует создания надежных хранилищ РАО.

2. Задача выбора и создания долговременного геологического хранилища РАО, надежного в условиях верхней части земной коры, достаточно сложна и требует значительных научно-технических усилий и материальных затрат.

3. В статье приведены частичная оценка существующих в настоящее время требований, предъявляемых к выбору характеристик, для геолого-петрофизического обоснования проектирования хранилищ, как составной части работ по их созданию, в частности, в кристаллических породах.

4. В результате геолого-палеогеодинамического и петрофизического анализов гранитоидов Коростенского плутона можно считать условно пригодными для создания системы захоронения РАО следующие петротипы: граниты лезниковские, игнатпольские, норинские, рассоховские, потиевские, а наиболее пригодными — граниты рапакиви потиевские, малинские и рапакивиподобные игнатпольские.

5. На примере комплексного геолого-петрофизического и петрохимического изучения гранитоидов коростенского комплекса Волинского мегаблока Украинского щита с использованием интегрального петрофизического палеогеодинамического анализа ведущих петротипов пород сделана оценка их пригодности для создания долговременных хранилищ РАО как необходимого звена в их последующей геологической привязке, технико-экономическом и социальном обосновании.

Список литературы

- 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее: Нац. докл. Украины. — Киев: Атика, 2006. — 232 с.
- Белевцев Р.Я., Дудко В.С., Спивак С.Д., Чуприна И.С., Яковлев Б.Г., Яковлев Е.А., Герасименко А.Е., Белевцев А.Р. Коростенский плутон — петрогенезис, перспективы рудоносности, проблемы изоляции радиоактивных отходов // Минерал. журн. — 1996. — 18, № 6. — С 30—59.
- Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых СССР / Н.Б. Дортман, В.И. Васильева, А.К. Вейнебург. — Москва: Недра, 1964. — 325 с.
- Евсеева Л.С., Перельман А.И. Геохимия в зоне гипергенеза. — Москва: Госатомиздат, 1962.
- Закон України "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку" від 08.02.1995, № 39.
- Закон України "Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чернобыльської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблоку цієї АЕС на екологічно безпечну систему" від 11.12.1998, № 309.
- Закон України "Про поводження з радіоактивними відходами" від 30.06.1995, № 255.
- Закон України "Про ратифікацію Об'єднаної Конвенції про безпеку поводження з відпрацьованим паливом та безпеку поводження з радіоактивними відходами" від 20.04.2000, № 1688-III.
- Лаверов Н.П., Омелянченко В.И., Величкин В.И. Геоэкологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. — 1994. — № 6. — С. 3—20.
- Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. — Ленинград: Недра, 1972. — 312 с.
- Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Материалы конф., г. Женева, 8—20 авг. 1955 г. / Отв. ред. А.П. Виноградов. — Москва: Гостехиздат, 1956. — Т. 2.
- Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання (Довідник-навч. посіб.) / М.І. Толстой, Ю.Л. Гасанов, Н.В. Костенко та ін. — Київ: ВПЦ "Київ. ун-т", 2003. — 329 с.
- Петрографія, акцесорна мінералогія гранітоїдів Українського щита та їх речовинно-петрофізична оцінка / М.І. Толстой, Н.В. Костенко, В.М. Кадурін, Ю.Л. Гасанов, А.П. Гожик, О.В. Чепіжко. — Київ: ВПЦ "Київ. ун-т", 2008. — 356 с.
- Толстой М.И., Гожик А.П. "Динамическая" петрофизика и основные перспективы ее использования // Геофиз. журн. — 2007. — 29, № 3. — С. 15—21.
- Толстой М.И., Гожик А.П., Сухорага А.В. Явища петрофізичної фіксації геодинамічних процесів гранітоїдними утвореннями. Винахід № 333. — 2007.
- Холоша В.І., Соботович Е.В. Концепція Чернобыльської зони відчуження // Проблеми Чернобыльської зони відчуження. — 1994. — Вип. 1. — С. 3—16.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Соботович Э.В., Бревитуц В., Шибецкий Ю. А., Шишиц И. Ю., Белевцев Р.Я., Миколайчук Е.А., Шимкив Л.М., Гриценко Н.Н., Яковлев Е.А., Проскура Н.И., Корчагин П.А., Стеценко Б.Д., Богуславский А.С., Токаревский В.В., Азимов А.Т., Бондаренко Я.И., Зайонц И.О., Токаревский А.В., Колябина И.Л., Литинский Ю.В., Бобровский В.А., Манькин В.И. Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины (проблемы и возможные решения). — Киев: Науч.-инж. центр радиогидроэкол. полигон. исследований НАН Украины, 2006. — 398 с.