

В.Л. СЕДІН, д.т.н., професор, завідувач кафедри ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Є.А. БАУСК, зав. лабораторії досліджень атомних та теплових станцій Придніпровського науково-освітнього інституту інноваційних технологій в будівництві

В.Ю. УЛЬЯНОВ, с.н.с. лабораторії досліджень атомних та теплових станцій Придніпровського науково-освітнього інституту інноваційних технологій в будівництві

К.М. БІКУС, к.т.н., доцент ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

УДК 550.34:551.243:550.835.2

ШКАЛА ОЦІНЮВАННЯ АКТИВНОСТІ ТЕКТОНІЧНИХ РОЗЛОМІВ ЗЕМНОЇ КОРИ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ РАДОНОВИДІЛЕННЯ – ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ АЕС

Ключові слова: тектоніка, активний розлом, геодинаміка, сейсмічність, радонометрія.

Стаття оглядово-узагальнювального характеру. Запропонована шкала числової залежності ступеню активності тектонічних розломів земної кори від інтенсивності радоновиділення з надр, застосування якої дозволяє по-новому оцінювати сейсмотектонічні умови майданчиків, як діючих АЕС, так і тих, що будуються.

Статья обзорно-обобщающего характера. Предложена шкала численной зависимости степени активности тектонических разломов земной коры от интенсивности радоновыделения из недр, применение которой позволит по новому оценить сейсмотектонические условия площадок действующих и строящихся АЭС.

The paper proposes a numerical scale depending on the degree of activity of tectonic faults of the crust on the intensity of the subsoil radon emission. The presence of this scale will allow to reassess the seismotectonic conditions of construction sites, including both existing and under construction nuclear power plant.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.

Планета Земля як динамічна структура в різних точках має ділянки розвантаження напружено-деформованого стану (НДС). Одним із його показників у сейсмоактивних районах постає викид в атмосферу аномально високих концентрацій глибинних газів. В асейсмічних районах також визначаються прояви НДС Землі, які виражені в періодичних коливаннях інтенсивності потоку газів, що поступають до атмосфери. При цьому, незалежно від інтенсивності цих потоків, центри їх розвантаження у просторі залишаються не зміщеними.

Тектонічні (розривні) порушення земної кори – розломи – є одними із основних джерел порушень рівноваги літосфери. Масштабні розривні порушення (глибинні розломи) характеризуються довготривалою історією розвитку з численними, до сьогодні включно, етапами тектонічної активізації.

Для зон розломів характерна підвищена тріщинуватість гірських порід, їх дезінтеграція та водонасиченість, уздовж них активно розвиваються процеси карстоутворення, фіксуються значні

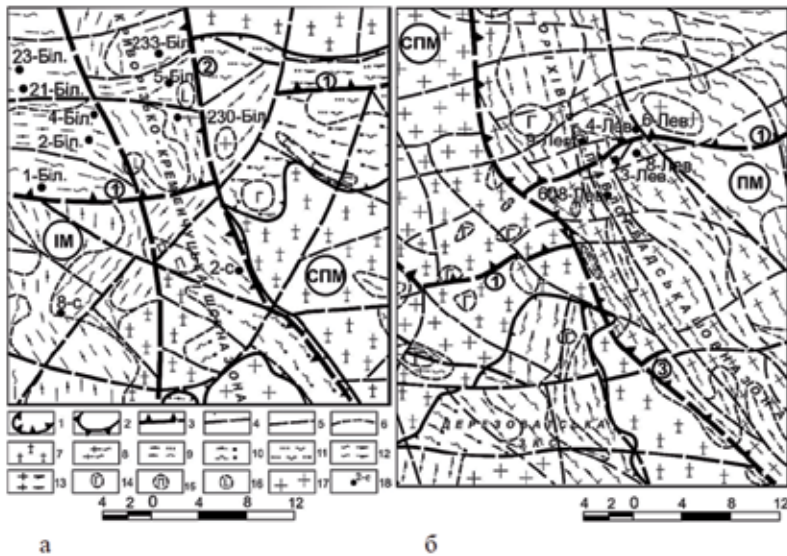


Рис 1. Геологічна будова зони Криворізько - Кременчуцького (а) та Орхівсько - Павлоградського (б) розлому: ІМ-Інгульський мегаблок, СПМ – Середньопридніпровський мегаблок, ПМ-Приазовський мегаблок; 1-південний крайовий глибинний розлом ДДЗ, 2-Криворізько-Кременчуцький розлом, 3-Орхівсько-Павлоградський розлом; 1-мезоархейські зеленокам'яні структури; 2-палеоархейські антиклінальні форми; 3-глибинні розломи І рангу; 4-крупні регіональні розломи ІІ рангу; 5- інші порушення; речовинні комплекси: 6-літологічні границі; 7-плагіограніти, 8- плагіомігматити, 9-амфіболіти і сланці з прошарками метаультрабазитів і залістистих кварцитів, 10 - слюдяні сланці і метасіковики, 11- останці змінених кристалосланців і гнейсів серед плагіогранітів, 12-останці змінених зеленокам'яних порід серед гранітоїдів, 13-гранітизовані зеленокам'яні породи; інтрузії: 14-базитів і ультрабазитів, 15-серпентинітів; 16-вулканіти; 17-граніти; 18-свердловини, що розкрили докембрійські утворення.

водоперетікання, встановлюється гідравлічний взаємозв'язок поверхневих та підземних вод. У результаті цих явищ у зонах динамічного впливу розломів спостерігаються деформації земної поверхні (розущільнення та осідання), що можуть призводити до порушень цілісності будівель, споруд, доріг, трубопроводів тощо. Важливо це враховувати для об'єктів підвищеної категорії відповідальності, до яких належать АЕС, ГРЕС, ГЕС.

В наш час найбільш відомим і вивченим розломом є розлом Сан-Андреас (штат Каліфорнія, США). На території Росії досконально вивчаються зони розломів Прибайкалля та Забайкалля. У межах Українського кристалічного масиву найбільший інтерес представляють Криворізько-Кременчуцький розлом (рис. 1а) та Орхівсько-Павлоградський розлом (рис. 1б), на окремих ділянках яких в останні роки (1996, 2000–2002, 2006, 2007, 2011, 2013 рр.) відзначені часті сейсмічні події.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До геофізичних факторів, які можуть бути задіяними для визначення ступеня активності тектонічних розломів на майданчиках АЕС, традиційно відносять газові еманациї різного складу, які часто супроводжують зони розломів [5].

В останні роки радону, як індикатору тектонічної події, приділяється велика увага, особливо в межах геодинамічних полігонів, що створюються навколо АЕС Росії та країн СНД, де активно впроваджують високочастотні геодезичні та сейсмологічні

дослідження, що доповнені комплексом спеціалізованих радіогідрогеохімічних досліджень. Додатковий імпульс роботи в цьому напрямку отримано після подій на АЕС „Фукусіма-Даїчі”.

Дослідженню зв'язку радонових еманаций з тектонікою займалися В.І. Альохін [6], В. І. Уткін [7-8], В. С. Яковлева [9], Т. Ш. Делатказін [10-11] та інші. Однак, переважна більшість досліджень пов'язана з вживанням виключно ґрунтового радону, проблематиці ж існування радону в підземних водах присвячена значно менша кількість робіт [18]. Це ж стосується і портативного обладнання, якого особливо недостатньо для організації безперервного автоматичного визначення радону в підземних водах, на чому уже наголошувалось [12]. У деяких наукових роботах (70-80 рр.) згадувались навіть захищені патентами подібні розробки, а також надавались свідчення про їх використання на геодинамічних полігонах ЄСРР, зокрема у Середній Азії. Однак, сьогодні у відкритому друці відомостей про їх застосування немає. Провідними приладобудівними підприємствами країн СНД це устаткування також не виготовляється, а поодинокі зарубіжні зразки, що існують в наявності,

або мають не виправдано завищену ціну, або потребують суттєвого коригування відповідно до задач виявлення активних розломів.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Ідеї з розробки шкали числової залежності ступеню активності тектонічних розломів земної кори від інтенсивності радоновиділення з надр виникали неодноразово, але її створення стримується необхідністю значно поширених, а головне – довготривалих і дорогих натурних досліджень. Сьогодні відома формалізована шкала, що запроваджена О.В. Луїною [13], яка більше схожа на привласнену за сукупністю посередніх ознак балів.

Ряд дослідників окресленої проблеми взагалі висловлювали сумніви у можливості створення розробки технологічно закінченої числової шкали, ут.ч. і через причину відсутності необхідного для потреб задач досліджень устаткування. Це при тому, що використання можливостей радонометрії в комплексі геодинамічної діагностики гірського масиву, ут.ч. і під основу майбутньої АЕС, сумнівів не викликає, оскільки дозволяє оптимізувати виконання досліджень і підвищувати достовірність кінцевих результатів.

Мета роботи. Головною задачею досліджень, які проводять у районах зі складними сеймотектонічними обставинами, є, перш за все, виявлення активних розломів, особливо в межах майданчиків під майбутнє енергетичне будівництво, оскільки наявність таких розломів є одним із найбільш важливих обмежуючих параметрів, які враховуються для забезпечення

придатності майданчиків під АЕС. Тому, фактично, необхідно вирішити задачу з розробки своєрідної шкали що віддзеркалює зв'язок величини радоновиділення із зон тектонічних розломів зі ступенем їх активності, з урахуванням можливої активізації.

Виклад основного матеріалу. Кількісні характеристики газових еманцій залежать від багатьох параметрів (від фаз Місяця, положення Землі на орбіті, інтерференції гравітаційних хвиль різного порядку тощо). Для одного з газів залежність виявити досить складно, оскільки не до кінця відомі процеси в надрах Землі. І для цієї ж мети бажаним є набір газів із різними властивостями: наприклад, із активним воднем, здатним до окислення, який дає температурні сплески; інертним гелієм, що не залежить від хімічних реакцій; приземним озоном та, нарешті, радоном (^{222}Rn), одна з властивостей якого – малий період напіврозкладу, та таких, що мають найбільш розроблені методики вимірювань, а також виділяють дочірні продукти розпаду, перешкодостійких, що особливо актуально для урбанізованих територій. Все це є основою для використання радону в якості одного з індикаторів (трасерів) під час виявлення зон порушень суцільності порід геологічного розрізу.

У відповідності з документом МАГАТЕ «SSG-9» (Міжнародна агенція з атомної енергії. «Керівництво з безпеки-9») розлом вважається активним, якщо:

- присутні ознаки в минулому руху або рухів (наприклад, значні деформації та/або дислокації) повторного характеру під час такого тривалого періоду, що було б логічним зробити висновок про те, що має відбуватись подальший рух на поверхні або близько неї; у сейсмоактивних областях, мабуть, доцільно виділяти періоди порядку десятків тисяч років (наприклад, верхній плейстоцен – голоцен – тобто наступний час); в асейсмічних областях виділяють значно довший період (наприклад, третинний – четвертинний періоди – тобто по наступний час);
- якщо структурний зв'язок зі встановленим активним розломом розташований таким чином, що рух одного розлому може призвести до руху іншого на поверхні або близько неї;
- якщо максимальна потенціальна магнітуда, що відповідає якій-небудь сейсмогенній структурі, як це позначено у відповідному розділі, достатньо більша, а її глибина така, щоб логічно було б зробити висновок про те, що в існуючій тектонічній ситуації на майданах АЕС може статися рух на поверхні або близько неї.

Окрім того, для майданчиків нових АЕС „SSG-9” пропонує:

- у випадках, коли є достовірні свідчення про те, що активний розлом потенційно може вплинути на безпеку АЕС, можливість проектування будівництва повинна бути переглянута та, за необхідністю, повинна бути розглянута альтернативна схема розташування майбутнього майданчику;

- що стосується рекомендацій SSG-9 відносно шкали часу, то підтвердження відсутності руху в четвертинному періоді також враховується достатнім доказом відсутності сучасної тектонічної активності.

Однак, дані рекомендації, мають все ж достатньо узагальнений та описовий характер, в якому відсутня яка-небудь обґрунтовано чітка числова залежність факторів (параметрів геодезичних полів і ступеню активності розломів), якщо такі мають бути виявлені на майданчику АЕС, що проектується, або існуючої (наприклад, під час проведення додаткових вишукувань). Наведені ж в нормативних документах (НП-032-01, НП-050-03, НП-064-05) характеристики розломних зон також не можуть бути свідченням наявності в таких зонах сучасної тектонічної активності [1-3]. Про складність адаптації вищенаведених вимог до реальних умов майданчиків АЕС зазначає А. Д. Сашурін [4].

Для розв'язання цієї задачі, була експериментально встановлена відповідність геодинамічного районування за даними еманційної зйомки та геодинамічного районування за даними GPS-вимірювань сучасних геодинамічних рухів. Дані радонометрії віддзеркалювали увесь частотний спектр сучасних геодинамічних рухів. Залежність параметрів поля радонових еманцій від параметрів та механізму сучасної геодинамічної активності дозволяє використовувати радонометрію у комплексі геодинамічної діагностики для оперативного геодинамічного районування. Геодинамічне районування гірського масиву на підставі еманційної зйомки дозволяло у ході виконання досліджень оптимально проводити вимірювання кількісних параметрів сучасної геодинамічної активності, у т.ч. й з використанням високоточних GPS-вимірювань. Також для успішного рішення даної проблеми необхідно комплексно вживати характеристики радону як у ґрунті, так і в підземних водах, що циркулюють у зоні розломів, бо на характеристики радону у ґрунті впливає безліч факторів, які серйозно ускладнюють встановлення стійких числових залежностей. Про наявність числової залежності між активністю розломів та інтенсивністю виділень радону з ґрунту згадується в роботах В.Б. Болтирова [14], Р.І. Голоудіна та А.Н. Шабарова [15]. Вони за інтенсивністю радоновиділення поділяють розломи на низько активні (менше 1000 Бк/м³) та високоактивні (більше 2000 Бк/ м³).

Власну методику оцінки активності розломних зон запропонували співробітники Інституту земної кори СВ РАН (Іркутськ, Росія) А.А. Бобров, К.Ж. Семінський та інші [16-18].

Контрастність еманційних аномалій за методикою СВ РАН оцінювалася за допомогою відносного показника $KQ = Q_{max} / Q_{min}^n$, де Q_{max} – максимальне значення параметра Q в зоні розлому, Q_{min} – мінімальне значення параметра Q в породах поза межами зони розлому.

Це дозволило, спираючись на значний фактичний матеріал польових досліджень в регіоні Забайкалля та Прибайкалля, мабуть, вперше виділити 5 груп роз-

Таблиця 1. Категорії розломних зон за еманацияною (радоною) активністю.

Еманацияна активність	Відносний показник контрастності еманацияних аномалій
- низька	$(KQ \leq 2)$.
- середня	$(2 < KQ \leq 3)$.
- підвищена	$(3 < KQ \leq 5)$.
- висока	$(5 < KQ \leq 10)$.
- надвисока	$(KQ > 10)$.

ломних зон за наступною еманацияною активністю (табл.1). На думку авторів, зони впливу 2-х останніх груп представляють безсумнівну небезпеку в плані побудови та експлуатації відповідальних будівель і споруд, до яких ізповним обґрунтуванням можуть бути віднесені АЕС.

Вказані вище залежності при певних припущеннях можуть бути справедливими і для об’ємної активності (ОА) радону в підземних водах. Зокрема, вживання даних залежностей в розрахунках для ряду геодинамічних полігонів надають цілком задовільні результати, які підтверджуються і паралельно виконаними геофізичними дослідженнями.

Узагальнюючи всі наявні результати подібних досліджень і приводячи їх якісний та кількісний аналіз, можна запропонувати наступну єдину шкалу активності розломів за даними радонометрії (табл. 2). Ця шкала обов’язково враховує і контрастність еманацияних аномалій.

Умови використання зазначеної шкали:

- відсутність будь-якої значної уран-торієвої мінералізації гірських порід у зоні розломів (що можуть значно викривлювати результати досліджень), та суттєвих гідрогеохімічних бар’єрів для садження радію;
- незначна товщина пухкого осадового чохла або зони вивітрювання понад розломними зонами у кристалічних породах;
- комплексність проведення робіт.

При сумісності значень усіх 3-х базових параметрів шкали, які встановлені у результаті проведення всього комплексу робіт, достовірність визначення ступеня активності розломів буде значно вищою. У протилежному випадку, будуть необхідні додаткові уточнюючі дослідження окремих параметрів. Однак, і в цьому вигляді вказана шкала цілком може бути використана.

ВИСНОВКИ

В даній статті вперше запропонована єдина універсальна шкала числової залежності ступеня активності тектонічних розломів земної кори від

інтенсивності виділення радону, причому як із ґрунту, так і з підземних вод.

Наявність вказаної шкали дозволить по-новому оцінювати сейсмотектонічні умови майданчиків, не тільки АЕС, що будуються, але й діючих АЕС. Зокрема, віднесення зон розломів до

активних та, особливо, до високоактивних, є достатньою підставою до виконання на майданчиках АЕС спеціальних сейсмотектонічних розвідкувань.

Запропонована шкала є універсальною, бо придатна не тільки для радону у ґрунті, а і для радону в підземних водах, які циркулюють у зонах розломів. Діапазон шкали ОА радону в підземних водах є оптимальним для завдань сейсмопрогнозу.

Однак, існує потреба в додаткових дослідженнях, які пов’язані з якісним експрес-випробуванням ОА радону у ґрунті та, що особливо важливо, у підземних водах. Необхідна єдина методика відбору проб води із свердловин на радон, яка сьогодні фактично відсутня, як, до речі, і нормативна база. Мова йде, у першу чергу, особливо про опробування водоносних горизонтів у зонах розломів, (що потрібно було б виділяти в окрему гідрогеологічну структуру), а не в пухких відкладеннях різноманітного генезису, які їх перекривають. Під час таких досліджень цілком можливо уточнення граничних параметрів запропонованої шкали, яка може відрізнитися для асейсмічних і сейсмоактивних регіонів.

Потребують подальших досліджень і вдосконалення оцінка та врахування впливу на параметри означеної шкали радіоактивних мінералів, які достатньо часто зустрічаються в пухких і скельних гірських породах окремих регіонів. Ці мінерали, якщо вони присутні у значній кількості, можуть суттєво викривляти результати досліджень.

Подальшому вивченню підлягає також виявлення можливої залежності вмісту ОА радону від гідродинамічних та інших умов водопунктів, у різних типах свердловин: самопливних, дренажних з постійною або періодичною відкачкою, а також від особливостей підземних вод (термальних, газуючих тощо).

Важливим фактором є саме розташування випробуваних свердловин по відношенню до елементів розломних зон. Не підлягає сумніву, що профілі свердловин (кількістю не менш 3-х, причому центральна свердловина – безпосередньо в зоні розлому) повинні бути розташованими майже навхрест простягання розломних зон. Загальна кількість профілів залежить від тривалості зони розломів у межах майданчика, що досліджується.

Із практики проведення радонометрії на об’єктах, ут.ч. і ядерного комплексу, постає, що для цієї мети необхідні свердловини особливої конструкції, можливо з растурбом або так званим „дзвоном” у попередзабійній частині, у

Таблиця 2. Шкала активності тектонічних розломів за інтенсивністю радоновиділення.

Базові параметри, що визначаються	Ступінь активності розломів				
	не-активні	низько-активні	середньо-активні	активні	високо-активні
інтенсивність радоновиділення із зон розломів, Бк/м³ (радон у ґрунті)	<1500	1500 – 8000	8000 – 35000	35000-10000	>100000
інтенсивність радоновиділення із зон розломів, Бк/л (радон у підземних водах)	< 1	1 – 10	10 – 50	50-100	100-185
коефіцієнт контрастності еманацияних та водних аномалій KQ	$KQ \leq 2$	$2 < KQ \leq 3$	$3 < KQ \leq 5$	$5 < KQ \leq 10$	$KQ > 10$

будь-якому випадку, із проникним дном великої площини на потужній фільтруючій основі. Використання ж для цієї мети більшою частиною вже існуючих свердловин (гідрогеологічних, інженерно-геологічних, розвідувальних, технологічних та ін.), що мають до того ж різну конструкцію (частіше за все – із заглушенням відстійником), і передбачало в більшості випадків низьку інформативність раніш проведених досліджень.

Практичне використання запропонованої шкали може бути виконано на майданчиках як діючих АЕС, так і тих, що будуються, причому розташованих як у сейсмічних, так і в асейсмічних регіонах. Цілком можливо, що результатом подібних досліджень може стати суттєва переоцінка тектонічних умов та сейсмічності майданчиків АЕС з точки зору активності існуючих розломів

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности: НП-032-01. - Госатомнадзор России от 08.11.2001, № 10 - М., 2001.
2. Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03. Утв. Госгортехнадзором России от 31.12.2003, № 11. - Москва, 2003.
3. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии: НП-064-05. -Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.12.2005, № 16. - Москва, 2005.
4. Сашурин А.Д. Уровень обеспеченности геодинамической безопасности объектов атомной энергетики / Сашурин А.Д. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 12.
5. Бугаев Е.Г. Перспективы использования геофизических полей при выборе площадки и обосновании стабильности геодинамических и сейсмических условий при эксплуатации АС / Бугаев Е.Г., Спивак А.А., Соловьев С.П. // Ядерная и радиационная безопасность, № 4 (70), 2013.
6. Алехин В.И. Особенности проявления разломных зон Приазовского блока Украинского щита в мезо-кайнозойских осадочных толщах и почвах / Алехин В.И. // Геолого-мінералогічний вісник. - 2005. - № 2.
7. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения / Уткин В.И., Юрков А.К. // Докл. РАН.-1998, Т.358, -№ 5. - С. 675-680.
8. Уткин В. И. Пространственно-временной мониторинг радона и проблема среднесрочного прогноза тектонических землетрясений // Уральский геофизический вестник. - Екатеринбург, 2000. - № 1.
9. Яковлева В.С. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды / Яковлева В.С., Каратаев В.Д. // Вулканология и сейсмология. - 2007. - № 1. - С. 74-77.
10. Далатказин Т.Ш. Диагностика современной геодинамической активности горного массива при строительстве и эксплуатации ответственных объектов / Т.Ш. Далатказин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - № 11. - С. 120-123.
11. Далатказин Т.Ш. Использование радонометрии при изучении современной геодинамики на территориях, перекрытых мощным чехлом осадочных пород для решения задачи обеспечения безопасной эксплуатации объектов недропользования / Т.Ш. Далатказин // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2011. - №7. - С. 249-253.
12. Ульянов В.Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС с асейсмічних регіонах / В.Ю. Ульянов // Проблемы недропользования. - 2015. - № 1. - С.103-107.
13. Лунина О.В. Формализованная оценка степени активности разломов в плиоцен-четвертичное время (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. - 2010. - № 4, т. 51. - С.525-539.
14. Болтыров В.Б. Асейсмічная тектоника и связанные с ней природные риски Оценка и управление природными рисками / Болтыров В.Б., Грачев В.А., Турчанинов М.В. // Материалы Всероссийской конференции "Риск-2003", 2003. - Москва: РУДН. - 2003. - Т.1. - С. 320-321.
15. Голоудин Р.И. О многообразии форм проявления активности недр в зонах разломов земной коры / Голоудин Р.И., Шабаров А.Н. // Разведка и охрана недр. - 2008. - № 2. - С. 55-57.
16. Бобров А.А. Исследования разломов земной коры по эманациям радона: опыт предшественников и организация полевого эксперимента / Бобров А.А. // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Сб. трудов научн.-технич. конфер. ф-та геологии, геоинформатики и геоэкологии ИрГТУ, Иркутск: ИрГТУ, 2006. - Вып. 6. - С. 6-10.
17. Семинский К.Ж. Радоновая активность разломов (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) / Семинский К.Ж., Бобров А.А. // Геология и геофизика. - 2009. - Т.50. - № 8. - С. 881-896.
18. Семинский К.Ж. Радон в нерадоновых подземных водах Байкальского региона. Пространственно-временные вариации / Семинский К.Ж., Рассказов С.В., Семинский А.К., Михеева Е.А. // Доклады АН. - 2014. - Т. 457. - № 5. - С. 573-578.