

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 523.165

В.М. БОНДАРЕНКО, Н.В. ДЕМИН, Б.М. КУЖЕВСКИЙ

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЛИТОСФЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАДИОАКТИВНОСТИ И ВЛАЖНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Изложены экспериментальные результаты по изучению связи между вариациями нейтронного излучения литосферного происхождения и естественной радиоактивностью. Измерения потоков нейтронов и параметров радиоактивности выполнялись синхронно и совмещались в пространстве. Выявлена линейная корреляция между вариациями потоков нейтронов и энергией от тепловых до нескольких МэВ и активностью Ra, Th и Rn. Изучено влияние изменения влажности пород на величину потока нейтронов в зависимости от их энергии.

Актуальность исследования естественных (литосферных) потоков нейтронов заключается в том, что многие специалисты придерживаются точки зрения патогенного влияния (в основном генетического) малых доз радиоактивности на биоту [3, 4], литосферными нейтронами. Учитывая большой взвешивающий коэффициент ($W_R = 20$) эквивалентной дозы для нейтронов в области энергий 200 КэВ—2 МэВ, патогенное воздействие нейтронных потоков весьма вероятно. Кроме того, в последнее время выяснилась высокая роль тепловых и медленных нейтронов в патогенном воздействии на биоту. Если учесть, что в естественном потоке нейтронов вблизи земной поверхности более 70% составляют нейтроны тепловых и медленных энергий, становится понятным важность изучения природы временных и пространственных вариаций нейтронного излучения литосферного происхождения.

Цель настоящей работы — установление корреляции потоков литосферных нейтронов с особенностями состава пород, главным образом с величиной активностей ^{226}Ra и ^{232}Th , а также объемной активностью радона и его изотопов как одного из естественных генераторов нейтронов. Для достижения указанной цели решены следующие задачи: выполнены измерения плотности потоков быстрых и тепловых нейтронов в естественных условиях; проведены синхронные и совмещенные в пространстве с потоками нейтронов измерения активности ^{226}Ra , ^{232}Th , объемной активности подпочвенного радона и влажности пород; составлена база данных измеренных параметров; найдены закономерные связи между плотностями потоков быстрых и тепловых нейтронов и активностями ^{226}Ra , ^{232}Th , объемной активностью подпочвенно-

го радона и влажностью пород, измеренной в естественном залегании.

Скорость образования нейтронов в единице объема Q_n в литосфере определяется скоростью образования Q_α α -частиц, концентрацией ядер различных элементов j , составляющих литосферу N_j , пробегом α -частицы Q_α в среде и сечением образования нейтрона σ_α^n при взаимодействии α -частицы с ядром j [2, 5, 6]:

$$Q_n = \sum_{j,n} N_j Q_\alpha R_\alpha \sigma_\alpha^n.$$

Суммирование в этой формуле проводится по всем возможным ядрам химических элементов, составляющим область, достижимую энергичными α -частицами, и по всем энергиям генерированных нейтронов. Количество образованных нейтронов N_n определяется выражением:

$$N_n = \frac{Q_n}{\lambda_n} = Q_n \tau_n = \frac{\sum_{j,n} N_j Q_\alpha R_\alpha \sigma_\alpha^n}{\lambda_n},$$

где τ_n — время жизни нейтрона в среде, λ_n — скорость гибели нейтронов в среде. Таким образом концентрация, следовательно, и плотность потока нейтронов должны линейно зависеть от скорости образования α -частиц в среде, т. е. от активности естественных радиоактивных элементов в литосфере.

Измерения плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов проводились в Москве, на улице Миклухо-Маклая в четырех точках, отстоящих одна от другой на 20 м, и в Загорском районе Московской области по профилям общей протяженностью 29,2 км с шагом 200–300 м.

Пробег нейтронов в горных породах не превышает $0,5 \pm 1,0$ м, поэтому ниже дана характеристика только четвертичных отложений, которые слагают приповерхностную часть района исследований. Четвертичные отложения имеют повсеместное распространение, представлены в разрезе тремя моренами (окского, днепровского и московского оледенений), разделенными флювиогляциальными песками. Окская морена, вскрытая скважинами, имеет мощность до 5 м. Водно-озерно-ледниковые отложения окско-днепровского межледниковья (мощностью 57 м и более) залегают на коренных породах или на окской морене и перекрыты всюду днепровской мореной. Последняя, залегающая на коренных породах или более древних четвертичных образованиях, представлена плотными красно-бурыми до темно-коричневыми суглинками с прослоями песка с гравием, галькой и валунами, имеет мощность до 50 м, чаще 15–20 м, и перекрыта днепровско-московскими флювиогляциальными песками мощностью 10–20 м (до 40 м и более в долинах рек) либо московской мореной, которая сплошным чехлом разной мощности перекрывает практически всю территорию участка исследований. Московская морена (мощностью до 60 м) представлена красно-бурыми неоднородными суглинками, сильно песчаными, с большим количеством гравийно-галечно-валунного материала изверженных пород.

Результаты совмещенных в пространстве и времени измерений потоков литосферных нейтронов и радиологических характеристик пород

Плотности потоков литосферных нейтронов в Загорском районе измерялись прибором типа РСУ-01 с блоком детектирования СБДН-01. При этом открытый блок детектирования измерял плотность потока тепловых нейтронов. Этот же блок детектирования, помещенный в замедлитель в виде сферы, покрытой кадмиевым экраном, измерял плотность потока быстрых нейтронов. Исключение влияния нейтронов нуклонной компоненты космического излучения [1] и реализация 4π -геометрии измерений достигались путем помещения детекторов в шурф глубиной 0,4 м и диаметром 0,2 м. Потоки литосферных нейтронов зависят от суммарной активности $^{226}\text{Ra} + ^{232}\text{Th}$, характеризующей ближайшую окрестность точки измерения, естественной влажности пород в этом же месте и объемной активности подпочвенного радона. Поэтому в шурфах, где производились измерения потоков литосферных нейтронов, синхронно выполнялись определения указанных выше параметров горных пород. Всего выполнено 41 измерение плотности потока тепловых нейтронов, 65 измерений плотности потока быстрых нейтронов и по 106 суммарной активности $^{226}\text{Ra} + ^{232}\text{Th}$, влажности и 92 определения объемной активности подпочвенного радона.

Обработка фактических данных сводилась к построению вариационных кривых распределения измеренных параметров (рис. 1). Интервал группирования x определялся по формуле:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,32 \lg N},$$

где x_{\max}, x_{\min} — максимальное и минимальное значения параметра в выборке, N — количество измерений.

При анализе этих вариационных кривых распределения измеренных параметров обращает на себя внимание следующее. Распределения всех параметров подчиняются нормальному или квазинормальному закону Гаусса, а распределение объемной активности подпочвенного радона логнормальному. Последнее объясняется тем, что в выборке объемной активности радона присутствуют данные не только нормального радонового поля, но и аномального, превышение которого над нормальным изменяется от нескольких десятков до 1000% и более. Распределения плотности потоков быстрых и тепловых нейтронов различаются как по конфигурации кривых распределения, так и по количественным характеристикам (рис. 1, а, б). Распределения плотностей потоков быстрых нейтро-

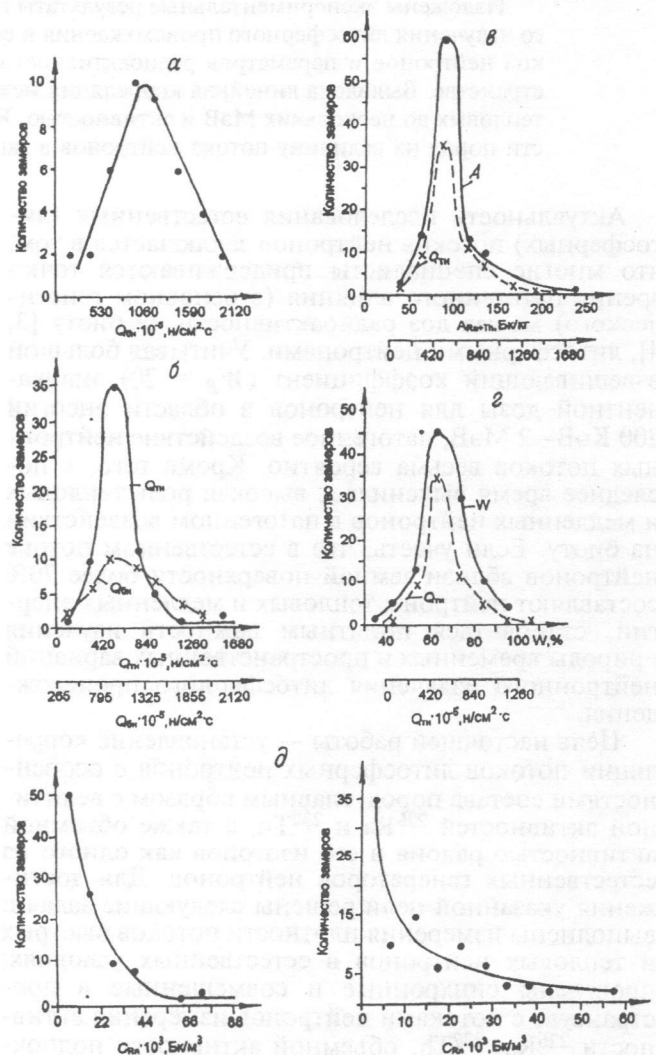


Рис. 1. Вариационные кривые распределения плотности потока быстрых (а) и тепловых (б) нейтронов, суммарной активности $^{226}\text{Ra} + ^{232}\text{Th}$ (в), естественной влажности пород (г) и объемной активности подпочвенного радона для двух различных интервалов осреднения (д)

нов более пологие, чем тепловых. Модальное значение плотности потоков быстрых нейтронов составляет около $1050 \cdot 10^{-5}$ н/см²·с, а тепловых лишь $530 \cdot 10^{-5}$ н/см²·с, да и в целом плотности потоков быстрых нейтронов выше, чем тепловых. Очевидно, это связано с поглощением тепловых нейтронов нейтронопоглощающими химическими элементами, содержащимися в горных породах. Следует отметить подобие вариационных кривых плотности потоков тепловых нейтронов кривым суммарной активности $^{226}\text{Ra}+^{232}\text{Th}$ и влажности пород в естественном залегании, но наблюдается заметное смещение модальных максимумов тепловых нейтронов относительно начала оси абсцисс (рис. 1, в, г). Это свидетельствует о том, что такие параметры горных пород, как суммарная активность $^{226}\text{Ra}+^{232}\text{Th}$ и влажность пород, являются опосредованными (через плотность потока быстрых нейтронов) факторами, оказывающими влияние на плотность потока тепловых нейтронов.

Первичные быстрые ($E = 1$ МэВ) литосферные нейтроны возникают под действием α -излучателей в радиоактивных рядах радия и тория на ядрах химических элементов горных пород. Таким образом, следует ожидать прямой корреляционной зависимости генерации быстрых нейтронов от содержания (или активности) этих радионуклидов в горных породах. При этом необходимо учитывать, что плотность потока быстрых нейтронов уменьшается с возрастанием влажности пород, так как водород, входящий в состав воды, является аномальным замедлителем быстрых нейтронов. С учетом этих соображений исследовались корреляционные зависимости между плотностью потока быстрых нейтронов и суммарной активностью радия и тория для различной влажности пород (рис. 2). Общая выборка включала 31 совмещенное в пространстве измерение. Как видно, существует прямая корреляционная связь между плотностью потока быстрых нейтронов и суммарной активностью $^{226}\text{Ra}+^{232}\text{Th}$ для различной влажности пород (70, 75 и 80%). Градиент корреляции потока быстрых нейтронов от величины суммарной активности радия и тория меняется от $9 \cdot 10^{-5}$ [(н/см²·с)/(Бк/кг)] для влажности пород 70 и 75% (рис. 2, а, б) до $4 \cdot 10^{-5}$ [(н/см²·с)/(Бк/кг)] при влажности 80% (рис. 2, в).

Зависимость измеренной плотности потока быстрых нейтронов от влажности пород подтверждается и экспериментально установленной обратной корреляционной связью между этими параметрами (рис. 3). Выборка представляла собой 39 синхронных и совмещенных в пространстве измерений указанных параметров. Для уменьшения относительно большой погрешности (около 50%) измерений плотности потока быстрых нейтронов фактические данные по этому параметру разделены на четыре группы для различных интервалов влажности (в среднем по 10 измерений в каждом интервале). Для каждого интервала влажности вычислялось среднее арифметическое значение плотности потока быстрых нейтронов и относилось к середине интервала. Так, первая слева точка на рис. 3 относится к середине интервала измерения влажности от 40 до 60%, вторая — от 60 до 73%, третья — от 73 до 80% и четвертая — от 80 до 95%. Как видно,

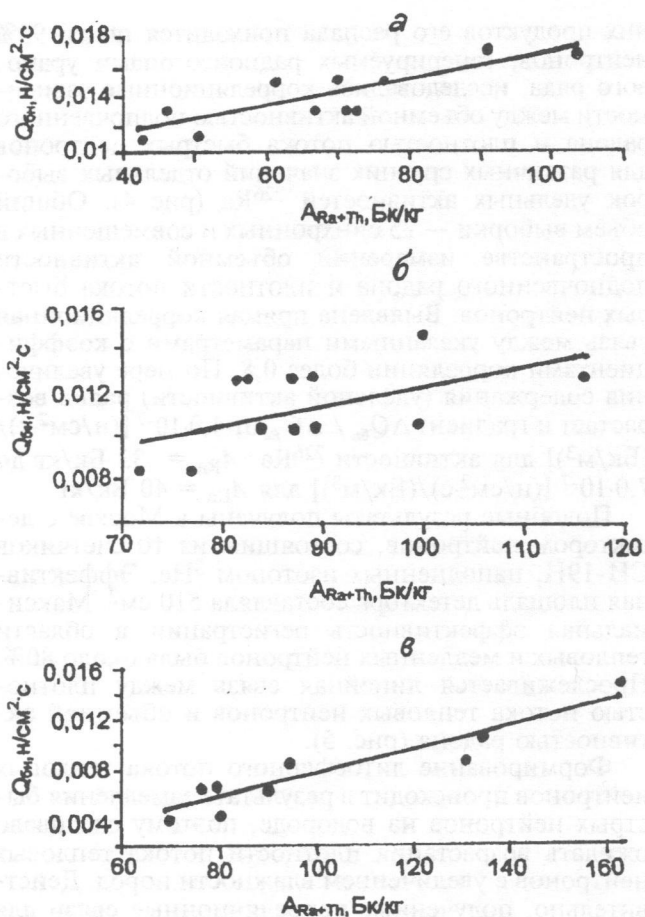


Рис. 2. Корреляционные зависимости между плотностью потока быстрых нейтронов $Q_{бн}$ и суммарной активностью радия и тория $A_{\text{Ra}+Th}$ для влажности пород W 70% (уравнение корреляции $Q = 9 \cdot 10^{-5}A + 0,0076$, коэффициент корреляции R 0,83) (а), W 75% ($Q = 9 \cdot 10^{-5}A + 0,0037$, R 0,54) (б), W 80% ($Q = 9 \cdot 10^{-5}A + 0,0017$, R 0,93) (в)

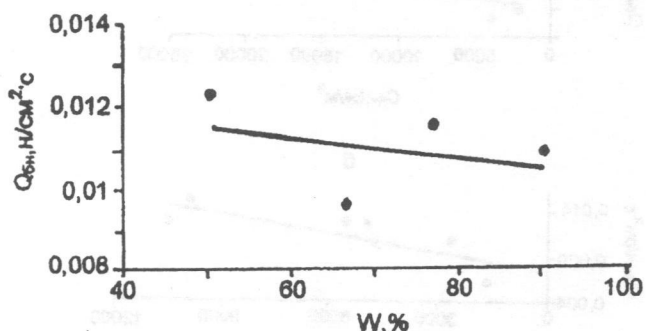


Рис. 3. Корреляционная зависимость осредненных в фиксированных интервалах влажности пород W плотностей потоков быстрых нейтронов $Q_{бн}$ от W , уравнение корреляции $Q = -3 \cdot 10^{-5}W + 0,0129$, коэффициент корреляции R 0,39

коэффициент корреляции составляет лишь 40%, что обусловлено значительным уменьшением плотности потоков быстрых нейтронов во втором интервале по отношению к трем другим. Этот факт пока не нашел объяснения, кроме большой технологической погрешности измерений.

Одним из генераторов литосферных нейтронов является α -излучение радона и дочерних продуктов его распада, первичным источником которых является ^{226}Ra . Учитывая, что на долю радона и дочер-

них продуктов его распада приходится почти 95% нейтронов, генерируемых радиоизотопами уранового ряда, исследовались корреляционные зависимости между объемной активностью подпочвенного радона и плотностью потока быстрых нейтронов для различных средних значений отдельных выборок удельных активностей ^{226}Ra (рис. 4). Общий объем выборки — 25 синхронных и совмещенных в пространстве измерений объемной активности подпочвенного радона и плотности потока быстрых нейтронов. Выявлена прямая корреляционная связь между указанными параметрами с коэффициентами корреляции более 0,8. По мере увеличения содержания (удельной активности) радия возрастает и градиент $\Delta Q_{\text{бн}} / \Delta C_{\text{Rn}}$ от $4,0 \cdot 10^{-7} [(\text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}) / (\text{Бк}/\text{м}^3)]$ для активности ^{226}Ra $A_{\text{Ra}} = 33$ Бк/кг до $7,0 \cdot 10^{-7} [(\text{н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}) / (\text{Бк}/\text{м}^3)]$ для $A_{\text{Ra}} = 40$ Бк/кг.

Подобные результаты получены в Москве с детектором нейтронов, состоящим из 10 счетчиков СИ-19Н, наполненных изотопом ^3He . Эффективная площадь детектора составляла 510 см^2 . Максимальная эффективность регистрации в области тепловых и медленных нейтронов была около 80%. Прослеживается линейная связь между плотностью потока тепловых нейтронов и объемной активностью радона (рис. 5).

Формирование литосферного потока тепловых нейтронов происходит в результате замедления быстрых нейтронов на водороде, поэтому следовало ожидать возрастания плотности потока тепловых нейтронов с увеличением влажности пород. Действительно, полученные корреляционные связи для общей выборки 54 измерений указанных парамет-

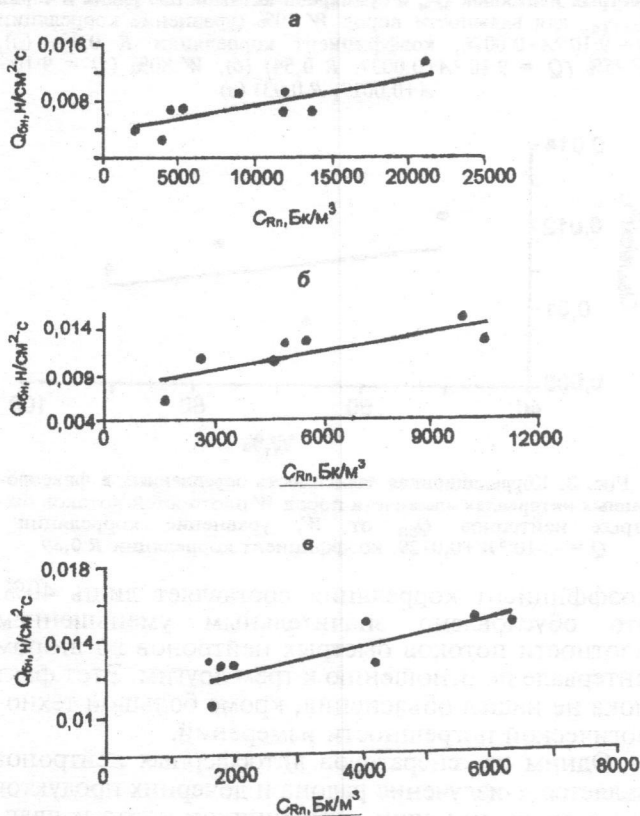


Рис. 4. Корреляционные зависимости плотности потоков быстрых нейтронов $Q_{\text{бн}}$ от объемной активности подпочвенного радона C_{Rn} для средней активности радия A_{Ra} : а 33, б 36, в 40 Бк/кг.

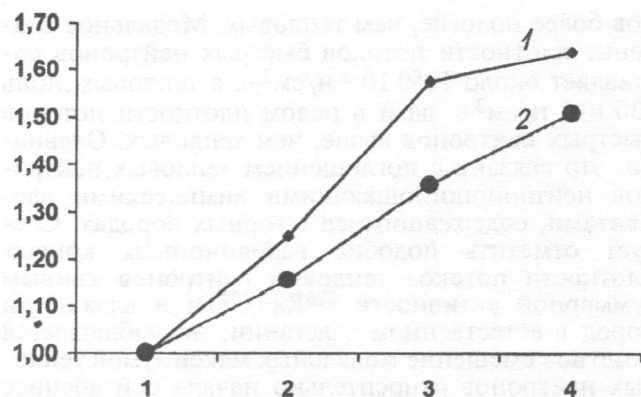


Рис. 5. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов (1) и объемной активности (2) радона в почве (в произвольных единицах) от места измерения. Данные нормированы на первую точку измерения. 1—4 — точки измерений

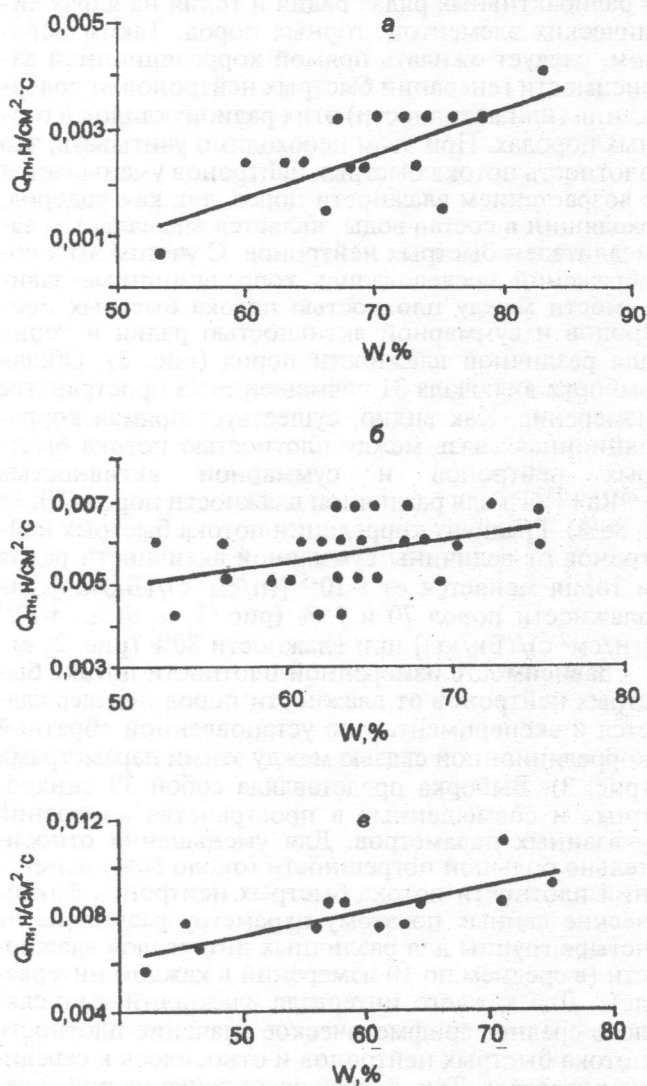


Рис. 6. Корреляционные зависимости плотности потоков тепловых нейтронов $Q_{\text{тн}}$ от влажности пород W для I группы измерений (уравнение корреляции $Q = 8 \cdot 10^{-5}W - 0,0021$, коэффициент корреляции $R 0,71$) (а), II группы ($Q = 6 \cdot 10^{-5}W + 0,0019$, $R 0,41$) (б), III группы ($Q = 1 \cdot 10^{-4}W + 0,0025$, $R 0,79$) (в)

ров, синхронных во времени и совмещенных в пространстве, показывают прямую зависимость плотности потока тепловых нейтронов от влажности пород для трех групп измерений (рис. 6). Деление общей выборки измерений на три группы (класса), по-видимому, обусловлено различным содержанием нейтронопоглощающих элементов. Этот вопрос требует дополнительных исследований, что подтверждается различными градиентами $\Delta Q_{\text{ТН}}/\Delta W$, которые составляют для I группы $8,0 \cdot 10^{-5}$, II $6 \cdot 10^{-5}$, III $1 \cdot 10^{-4}$ [(н/см²·с)/(%)].

Плотность потока тепловых нейтронов опосредовано, через поток быстрых нейтронов, зависит от содержаний (удельных активностей) радия и тория в горных породах. Действительно, корреляционные зависимости параметров, полученные для общей выборки из 51 синхронного и совмещенного в пространстве измерения, показывают прямую линейную связь между плотностью потока тепловых нейтронов и суммарной активностью радия и тория (рис. 7). Деление экспериментальных данных на две группы, вероятно, обусловлено различным содержанием нейтронопоглощающих химических элементов в горных породах. Градиент $\Delta Q_{\text{ТН}}/A_{\Sigma}$ для I группы оказался равным $9,0 \cdot 10^{-5}$, а для II — $6,0 \cdot 10^{-5}$ [(н/см²·с)/(Бк/кг)].

Таким образом, впервые экспериментально выявлены закономерности формирования потоков литосферных нейтронов в зависимости от радиологических свойств пород.

Выводы

Анализ совмещенных в пространстве и времени измерений плотности потоков литосферных нейтронов и радиологических свойств горных пород позволил сделать следующие основные выводы:

1. Измеренные в естественных условиях плотности потоков литосферных быстрых и тепловых нейтронов составляют порядка 10^{-3} – 10^{-2} н/см²·с для глинисто-песчаных пород Московской синеклизы.
2. Впервые экспериментально выявлены устойчивые прямые корреляционные связи между природными α -излучателями (активностями ²²⁶Ra, ²³²Th, объемной активностью подпочвенного радио-

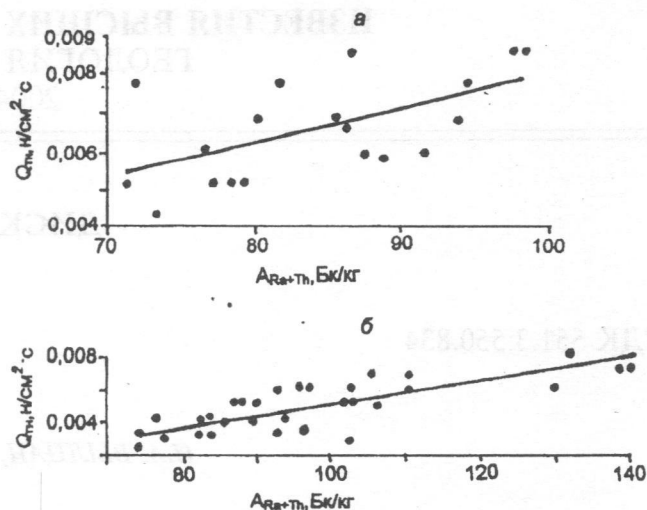


Рис. 7. Корреляционные зависимости плотности потоков тепловых нейтронов $Q_{\text{ТН}}$ от суммарной активности радия и тория $A_{\text{Ra+Th}}$ для I группы измерений (уравнение корреляции $Q = 9 \cdot 10^{-3} A - 0,001$, коэффициент корреляции $R 0,59$), II группы ($Q = 6 \cdot 10^{-3} A - 0,0007$, $R 0,75$) (б)

на) и плотностями потоков быстрых и тепловых нейтронов.

3. Установлены надежные корреляционные связи между измеренными в естественных условиях плотностями потоков быстрых и тепловых нейтронов и влажностью горных пород. При этом, как и следовало ожидать, для быстрых нейтронов получена обратная зависимость, а для тепловых — прямая.

4. Надежность выявленных корреляционных связей для тепловых нейтронов ниже, чем для быстрых, что можно объяснить, по-видимому, влиянием различных концентраций нейтронопоглощающих химических элементов на поток тепловых нейтронов.

5. Исследования в области изучения потоков литосферных нейтронов целесообразно продолжить в направлении изучения влияния переменной концентрации нейтронопоглощающих химических элементов, а также мониторинга нейтронных полей для решения экологических задач, в частности, прогноза чрезвычайных ситуаций и определения толщины снежного покрова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.М., Кульков Б.Н. Метод альbedo космических нейтронов изучения влажности пород. // Новые методы инженерной геофизики. М.: Недра, 1983. С. 48–97.
2. Володичев Н.Н., Захаров В.А., Кужевский Б.М. и др. Земная кора — активный источник нейтронов // Вестник МГУ. Сер. 3 Физика, Астрономия. 2002. № 5. С. 69–73.
3. Романюк С.С. Состояние обеспечения радиационной безопасности на нефтегазовых месторождениях // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). М.: 2002. №2. С. 41–45.
4. Захаров А.Д. Радиоактивный углерод ядерных взрывов и пороговые биологические эффекты // Советские ученые об опасности испытаний ядерного оружия. М.: Атомиздат, 1959. С. 36–45.
5. Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Panasyuk M.I. et al. Neutron field of the Earth. Origin and Dynamics // J. Korean Assa. Rad. Prot. 2001. V. 26, N 3. P. 315–319.
6. Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Sigaeva E.A. et al. Neutron flux variation near the Earth's crust. A possible tectonic activity detection // NHESS. 2003. V. 3. P. 19.

Московский государственный геологоразведочный университет
Московский государственный университет
Рецензент — А.А. Никитин