

УДК 550.378:621.039.9(24)

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ТРИТИЯ НА УЧАСТКАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**Апенько А.В., Романов А.М., Токаев Д.Н., Фролов З.Н.***Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

По результатам площадной съемки эксхалляции трития на ряде участков Семипалатинского испытательного полигона установлены три основных типа распределений повышенной активности трития: 1 – линейно-мозаичные на участках со слабыми или практически отсутствующими нарушениями геологических структур (за пределами участков взрывов); 2 – преимущественно линейные, связанные с природными разломами, интенсивно подновленными взрывами на участках взрывов; 3 – кольцевые, связанные с техногенными (кольцевыми) структурами, образованными непосредственно взрывами. Обычно распределения трития второго и третьего типа проявляются совместно. Отмечены большая стабильность результатов и глубинность съемки эксхалляции трития по сравнению результатами замеров эксхалляции радона. Установлена пространственная связь аномальных повышений активности трития с гидродинамическими структурами, выявленных методами структурной геофизики. Показаны преимущества использования методики газовой съемки активности трития для подтверждения связи гидродинамических структур с очагами подземных ядерных взрывов.

В недрах Семипалатинского испытательного полигона (СИП) в результате тестирования ядерного оружия образовалось значительное количество продуктов ядерных взрывов. По различным оценкам это – от 67 до 96 % общей активности техногенных радионуклидов. Наибольшей активностью характеризуется ^{137}Cs и, несколько меньшей – ^{90}Sr . Еще одним важным продуктом ядерных взрывов является тритий. Фактически повышенные и высокие активности указанных радионуклидов наблюдаются в течение десятков лет, несмотря на вынос веществ поверхностными и грунтовыми водами, что указывает на медленное поступление радионуклидов из горных пород в газовую и водную фазы литосферы. Источники нейтронов в продуктах, образованных ядерными взрывами, характеризуются намного меньшей активностью по сравнению с источниками альфа-, бета- и гамма-излучений. Соответственно, они не могут обеспечить наработку трития и других продуктов (тем более длительную) в объемах, сопоставимую с поступающей в окружающую среду в настоящее время. С учетом этого, предполагается, что в реальных геологических условиях современное поступление трития и других радионуклидов из очагов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в окружающую среду происходит в результате его выщелачивания, – перехода веществ из твердой фазы в жидкую. Выщелачивание предполагает нахождение трития в жидкой форме – преимущественно в виде тритиевой воды. Тем не менее, на участках ядерных взрывов отмечается наличие трития и в газовой фазе. В частности, по реке Шаган, проходящей через площадку Балапан, где производились ПЯВ в скважинах, отмечено аномальное поведение трития. На расстоянии четырех километров ниже по течению от Атомного озера наблюдается повышение активности трития в виде пика. Активность резко возрастает на интервале около сотни метров, а затем быстро снижается на интервале около

600 м. Далее, вниз по течению, на интервале около 1 км интенсивность снижения существенно уменьшается и до места впадения реки Шаган в реку Иртыш происходит постепенное снижение активности трития. Подобное распределение активности можно объяснить только тем, что в речные воды поступают грунтовые и трещинные воды, загрязненные продуктами взрыва от скважины № 1004. Причем воды содержат тритий и в виде газа, и в виде тритиевой воды. Быстрое уменьшение активности связывается с барботажем, в результате которого газовый тритий улетучивается из воды в атмосферу. Соотношение активности газового и водного трития при этом составляет 5:2. Возможно, что именно дальнейшим переходом водного трития в газовый (а не разбавлением за счет водопритока) объясняется постепенное снижение его активности в водах реки Шаган.

Согласно термодинамическим представлениям самопроизвольное образование газового трития из тритиевой воды крайне маловероятно (энергия Гиббса реакции образования газового трития из воды положительна и существенно отлична от нуля). Температура горных пород и вод, а также давление в верхних слоях литосферы не могут обеспечить прохождения этой реакции. Путем последовательного исключения возможных физических причин единственно возможным путем образования газового трития остается внешнее воздействие на тритиевую воду электрического поля.

Электрическое поле образуется в обязательном порядке при движении вод относительно горных пород [1]. Его уровень определяется динамическим, структурным и вещественным факторами гидродинамической структуры, по которой движутся воды [2]:

- динамическим – скорости движения вод относительно горных пород;
- структурным – особенностями пространственных характеристик гидродинамических структур, оп-

ределяющих изменчивости поперечных сечений потоков вод;

– вещественным – минеральными особенностями, определяющими отношения удельных электрических сопротивлений твердой и жидкой фаз.

Эти факторы могут влиять на взаимодействие горных пород и вод только через посредство электрического поля. Значения напряженности электрического поля потенциалов течения могут обеспечивать прохождение электрохимических (точнее – электрофизических) реакций межфазного перехода веществ [2], в том числе происходящих в техногенных гидродинамических структурах.

Техногенные структуры на СИП представлены кольцевыми зонами трещиноватости, которые образуются при локальном интенсивном механическом воздействии ядерного взрыва и окружают его гипоцентр. Кроме того, взрывы подновляют существующие природные образования – разломы, существенно увеличивая их мощность и трещиноватость. Геологические разломы характеризуются преимущественно линейной формой.

На поствзрывной стадии вмещающая среда остывает, происходит заполнение полостей очагов ПЯВ, кольцевых и линейных зон разломов подземными водами. Спустя первые месяцы после взрыва в недрах формируется гидродинамический режим с преимущественным прохождением потоков вод через зоны максимально разрушенных горных пород. Движение вод и происходящее при этом выщелачивание обуславливают вынос продуктов взрывов по каналам техногенных и природных гидродинамических структур.

В состав продуктов взрыва входит тритий – самый миграционноспособный радионуклид. Период полураспада трития – 12,3 года, т.е. тритий в форме паров тритиевой воды может достичь поверхности земли в результате диффузии из недр. Результаты исследований, проведенных в ИРБиЭ НЯЦ РК на площадках ПЯВ показывают, что пары водного трития отмечаются в редких случаях и преимущественно на устьях боевых скважин. Амплитуда повышений в приземном слое атмосферы при этом не превышает 60 Бк/м^3 [1]. Таким образом, способность дистанционного обнаружения подземных потоков вод с повышенными активностями радионуклидов на основе замеров водного трития вызывает сомнение. Поэтому основное внимание в данных исследованиях уделено замерам газового трития. Газовый тритий характеризуется высокой проникающей способностью в твердой, жидкой и газовой фазах, уступающей только проникающей способности водорода. Плотность сухого воздуха при 20°C и $101,325 \text{ кПа}$ составляет $1,2041 \text{ кг/м}^3$. Плотность трития при нормальных условиях составляет $6/29$ от плотности воздуха, или – $0,2491 \text{ кг/м}^3$. Тем самым определяется предпосылка подъема газового трития из недр на дневную поверхность.

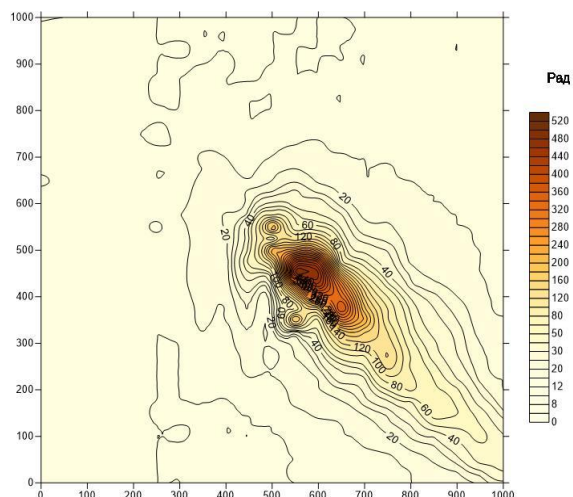
Движение трития наиболее вероятно и происходит с максимальной скоростью по газовой фазе пор и трещин горных пород. В [3] предложена формула, определяющая скорость движения трития в горных породах. Расчеты, проведенные по этой формуле, показали, что значения скорости движения трития в результате воздействия подъемной силы в интенсивно трещиноватых горных породах могут составлять $\sim 3,7 \text{ м/сек}$ – для заполненного воздухом пространства трещин и $\sim 30 \text{ м/сутки}$ – для заполненного водой пространства трещин. Скорость движения трития в монолитных породах на 3–5 порядков меньше, чем в зонах интенсивных пористости и трещиноватости. С учетом этих данных в самом неблагоприятном случае – заполнения водой пор и трещин на 100 %, – тритий достигнет дневной поверхности из зон образования газовой фазы за 10–20 суток. При этом активность его за счет распада уменьшается незначительно. Учитывая, что скорость диффузии трития на 2–3 порядка меньше скорости его подъема, она не скажется заметно на скорости подъема. Кроме того, расширение ореолов трития из-за диффузии по мере подъема из недр не превысит первых десятков метров.

Тритий является бета-излучателем, поэтому для измерений в полевых условиях использован альфа-бета радиометр с плоским кремниевым детектором. При этом было учтено, что: 1) в настоящее время бета-излучающие благородные газы на СИП отсутствуют; 2) при попадании в измерительную камеру твердофазных продуктов взрыва (пыль) фоновое излучение прибора должно возрастать (фактически увеличение бета-фона приборов за два месяца работы – не отмечено); 3) аномальные повышения альфа-активности за тот же период времени не выявлены (т.е. загрязнение детектора радоном и его дочерними продуктами распада при работах на СИП не происходило, что установлено многочисленными замерами на площадке Балапан).

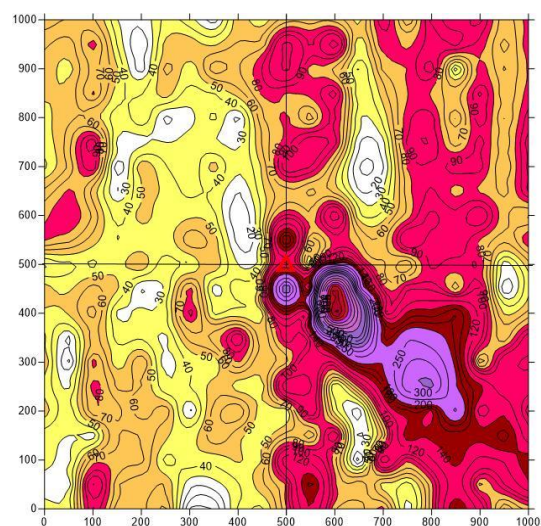
В подтверждение того, что в ходе замеров почвенного воздуха определяется именно тритий, на рисунке 1 сопоставлены данные гамма-съемки и эксхалации трития по скважине № 1301, где был проведен ПЯВ с нештатной ситуацией, в результате которой на дневной поверхности сформировался радиометрический ореол ^{137}Cs и ^{90}Sr (рисунок 1-а).

С этим ореолом связан также ореол аномальных значений эксхалации трития (до нескольких тысяч Бк/м^3 (рисунок 1-б). Совпадение интенсивных ореолов гамма-активности и эксхалации трития указывают на то, что аномальные значения активности трития действительно связаны с ореолами повышенных концентраций радионуклидов, а наличие дополнительных ореолов трития свидетельствует о большей глубинности эксхалационной съемки по сравнению с гамма-съемкой.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ТРИТИЯ НА УЧАСТКАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА



а) изолинии гамма-активности



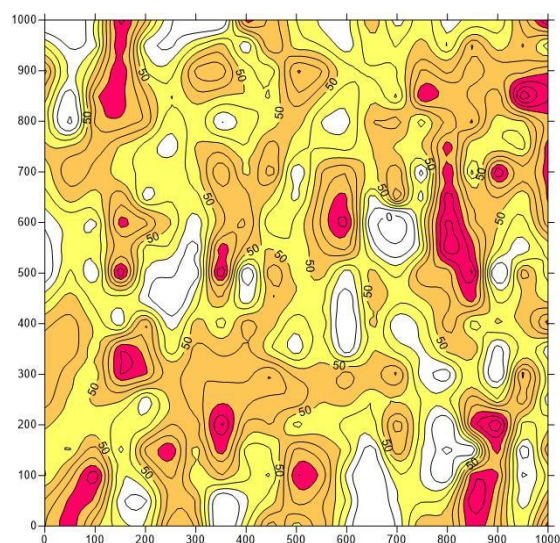
б) изолинии активности трития

Рисунок 1. Сопоставление данных пешеходной гамма-съемки и эксхалции трития по участку скважины № 1301 с нештатной ситуацией ПЯВ

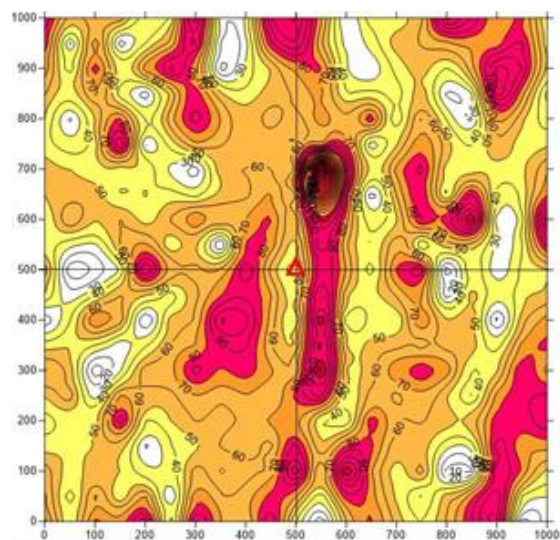
При проведении полевых съемок замер проб производился при непрерывной прокачке почвенного воздуха пробоотборником, устанавливаемым на дневной поверхности. Обеспечивались меры по ограничению возможности попадания в измерительную камеру атмосферного воздуха и пыли. Экспериментальным путем подбирались длительность прокачки, обеспечивающая оптимальную статистику замеров. Для всех участков тритиевой съемки (за исключением участка скважины с нештатной ситуацией) тройное стандартное отклонение было близко к 80 Бк/м³. Именно это значение принято для регистрации нижнего порога уверенной аномалии активности трития на площадке Балапан.

Анализом распределения активности трития на участках ПЯВ площадки Балапан установлены три основных типа распределений повышенной активности трития:

- 1 тип – линейно вытянутые ореолы, обычно расположенные вблизи устья скважин или на удалении от них. Вблизи боевых скважин ореолы более интенсивные и крупные, чем на участках, удаленных от эпицентров взрывов (рисунок 2-а);
- 2 тип – кольцевые ореолы, возникающие при локальном механическом воздействии большой мощности ядерного взрыва. Фактически они имеют форму чередующихся концентрических окружностей с эпицентром в очаге ПЯВ (рисунок 3);
- 3 тип – смешанные, представляющие комбинацию линейно-вытянутых и кольцевых форм (рисунок 4).



а) распределение активности на удалении от ПЯВ (участок скважины № 1208 на границе площадки Балапан)



б) распределение активности на участке скважины с ПЯВ (№ 1414, площадка Балапан)

- – низкие, □ – средние, □ – повышенные;
- – аномально высокие значения активности

Рисунок 2. Линейно вытянутые ореолы эксхалции трития (1 тип)

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ТРИТИЯ НА УЧАСТКАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

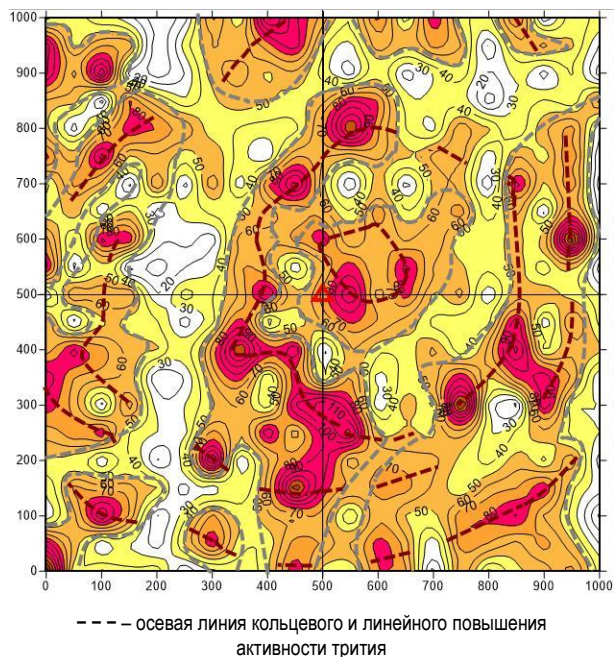


Рисунок 3. Кольцевое распределение активности эксгаляции трития на участке скважины № 1067 (2 тип)

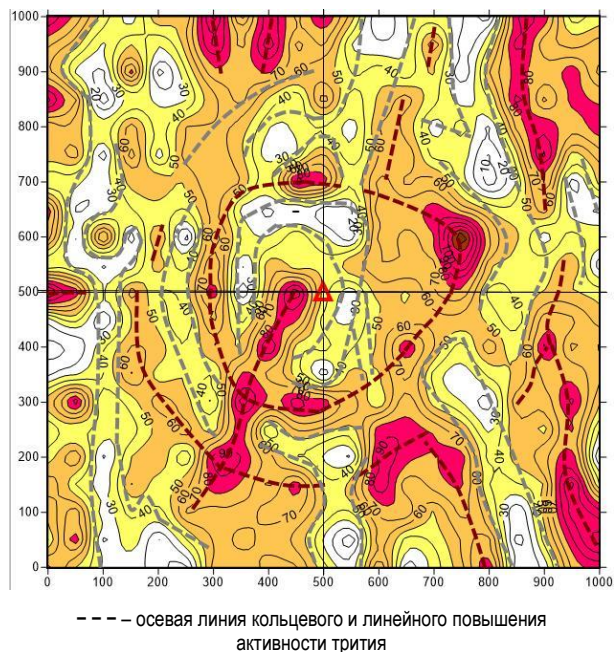


Рисунок 4. Смешанное кольцевое и линейное распределение активности на участке скважины № 1083 (3 тип)

Кольцевые зоны, представленные сплошными и/или ограниченными по протяженности ореолами трития аномального уровня (рисунок 3). Эти зоны подразделяются на зоны низких и высоких значений активности. Комбинации линейных и кольцевых зон (подновленных техногенных и кольцевых структур) являются наиболее распространенным вариантом, наблюдаемым на практике (рисунок 4).

Наиболее протяженные и широкие ореолы трития проявлены на дополнительном участке (рисунок 5),

расположенном в 2 км северо-восточнее скважины № 1004. В скважине № 1004 произведен экспериментальный взрыв с целью создания экскавационной емкости для хранения поверхностных вод. Фактически это приповерхностный взрыв с выбросом загрязненных пород на поверхность. На данном участке радионуклиды мигрируют не только по дневной поверхности, но и в недрах - с грунтовыми, а также трещинными водами.

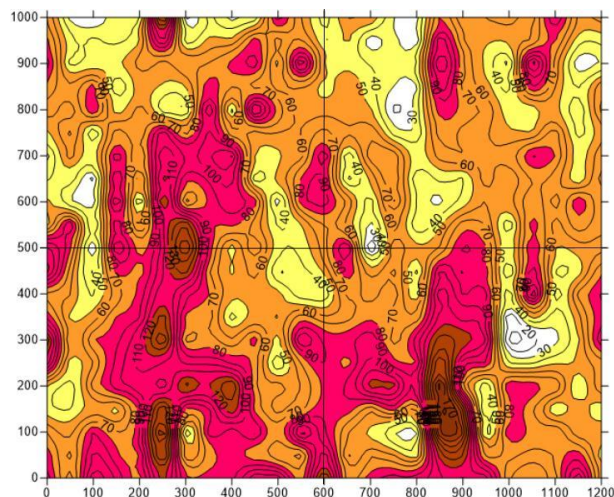


Рисунок 5. Распределение активности трития на дополнительном участке без ПЯВ

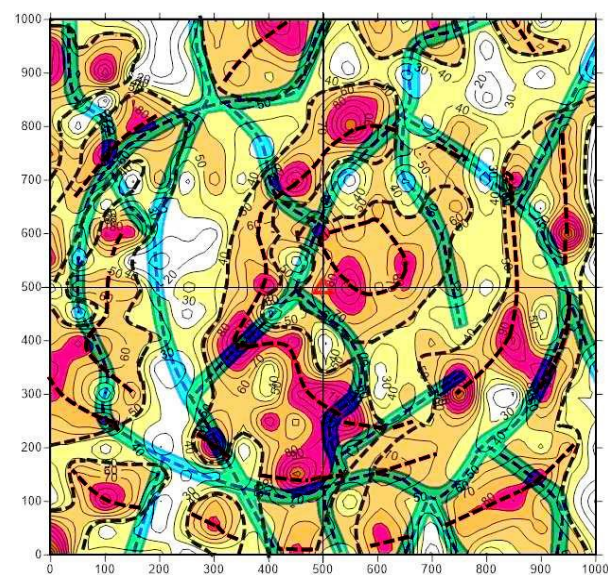


Рисунок 6. Сопоставление совместной уточненной схемы интерпретации ЕП и эксгаляции трития на участке со скважиной ПЯВ

Общий уровень аномалий активности трития на этом участке больше, чем на остальных участках. Исключением является участок скважины с нештатной ситуацией, где продукты взрыва выброшены на поверхность.

В большинстве случаев ПЯВ производились на глубинах 300–600 м. На обследованных участках боевых скважин физико-геологические условия не обуславливают возможность подъема загрязненных вод из очагов ПЯВ к дневной поверхности, поэтому можно считать, что на участках ПЯВ Семипалатинского полигона глубинность съемки эксхалации трития превышает сотни метров. Приведенная глубинность на два порядка превышает глубинность радоновой съемки по причине того, что основным процессом переноса радона из недр на дневную поверхность является диффузия (обычно принимается, что предельная глубина обнаружения источника радона составляет 6 м). Возможность обнаружения источника трития в недрах на глубине нескольких сотен метров дополнительно указывает на то, что процесс подъема определяется не диффузией, а различием плотностей трития и атмосферного воздуха.

Представленные распределения трития являются типовыми для площадки Балапан и позволяют уточнять результаты интерпретации данных естественного электрического поля ЕП [4] с целью выделения гидродинамических структур миграции и накопления радионуклидов. Пример такой интерпретации, позволяющей уверенно выделить техногенные (кольцевые) и природные (линейные) пути миграции трития, приведен на рисунке 6.

Известно утверждение о том, что тритий является наилучшим маркером процесса миграции радионуклидов из очагов ПЯВ с потоками подземных вод. Характерной чертой процесса является наличие повы-

шенных и высоких активностей трития на всех участках загрязнения с повышенными концентрациями других, наиболее распространенных радионуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr). Обратное утверждение – недействительно, т.к. согласно практическим данным (ИРБиЭ, а также РГП ИГИ) на удалении от очагов взрывов в сотни метров, первые километры активность ^{137}Cs и ^{90}Sr снижается до малых (близких к фоновым) значений, тогда как активность трития остается высокой, близкой к исходной на расстояниях свыше 10 км.

Следует обратить внимание на стабильность и сравнительно малую погрешность тритиевой съемки. В максимально жестких условиях (разница во времени замеров – 21 сутки, использование разных приборов, участие разных операторов) погрешность измерений составила <15 %, а при исключении «ураганных» измерений – 10–12 %. Таким образом, обеспечена точность измерений, сопоставимая с погрешностью полевых гамма-радиометров.

Замеры газового трития на поверхности земли в сочетании с методами структурной геофизики позволяют уверенно выявлять гидродинамические структуры, переносящие радионуклиды в недрах. На этой основе предложена новая методика оценки радиоактивного загрязнения недр [2].

Исследования выполнены в рамках гранта МОН РК № 1758/ГФ4 «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов Семипалатинском испытательном полигоне» (2015–2017 гг.).

Научный руководитель Романов А.М., к.г.-м.н.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов. – Алматы: НАК «Казатомпром», 2003. – 247 с.
2. Романов, А.М. Физико-геологическая характеристика миграции радионуклидов / А.М. Романов. – Семей: Издательский дом «Интеллект», 2017 – 110 с.
3. Романов, А.М. Применимость геофизических методов для выделения структур переноса радионуклидов / А.М. Романов // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 2 (78).
4. Бахтин, Л.В. Проявленность техногенных структур в естественном электрическом поле / Л.В. Бахтин, А.М. Романов, Д.Н.Токаев // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 2 (78).

СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫНЫҢ ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР УЧАСКЕЛЕРІНДЕ ГАЗ ТРИТИЙ ТАРАЛУЛАРЫ

А.В. Апенько, А.М. Романов, Д.Н. Токаев, З.Н. Фролов

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Семей сынау полигонының бір қатар учаскелерінде тритий эксхалациясын аландық түсірулерінің нәтижелері бойынша тритийдің жоғары белсенділігі таралудың үш негізгі типтері анықталған: 1 – жарылыстар учаскелерінен шегінде ядролық жарылыстармен геологиялық құрылымдардың нашар бұзылу немесе олар іс-жүзінде жоқ болу учаскелерінде сызықты-өрнекті; 2 – жарылыстар учаскелерінде жарылыстармен белсенді жаңартылған табиғи жарылымдармен байланысты, көбінесе сызықты; 3 – жарылыстармен тікелей жаратылған техногенды (сақиналы) құрылымдармен байланысты, сақиналы. Әдетте тритий таралудың екінші және үшінші типтері бірге көрінеді. Радон эксхалациясын өлшеу нәтижелерімен салыстырғанда тритий эксхалациясын түсіруінің нәтижелері мен тереңділігінің үлкен тұрақтылығы белгіленген. Тритийдің аномальды жоғары белсенділігінің құрылымды геофизика әдістерімен айқындалған гидродинамикалық құрылымдарымен кеңістік байланысы анықталған. Гидродинамикалық құрылымдардың жерасты ядролық жарылыстардың ошақтарымен байланысын растау үшін тритий белсенділігін газдық түсіру әдістерін қолданудың артықтығы дәлелденген.

**DISTRIBUTION OF GASEOUS TRITIUM AT UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSION SITES
OF SEMIPALATINSK TEST SITE**

A.V. Apenko, A.M. Romanov, D.N. Tokaev, Z.N. Frolov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

According to the results of an area survey of tritium exhalation in a number of sites at the Semipalatinsk Test Site, three main types of increased tritium activity distribution have been established: 1 – linear-mosaic at the sites of weak and virtually absent disturbances of geological structures by nuclear explosions outside the sites of explosions; 2 – mostly linear, connected with the natural faults, intensely renewed by the explosions at the sites of explosions; 3 – ring ones, connected with technogenic (ring) structures, occurred directly by the explosions. Usually the distributions of tritium of the second and the third types are detected together. A great stability of results and the depth of the survey of tritium exhalation has been noted in comparison with the results of radon exhalation measures. A spatial connection of abnormal increases of tritium activity with hydrodynamic structures detected by the structural geophysics methods has been established. The advantage of using the method of gaseous survey of tritium activity to confirm the connection of hydrodynamic structures with the foci of underground nuclear explosions has been proved.