

ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВОГО ПЛАСТИКОВОГО ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА МАРКИ CZ

© 2011 г. С. В. Стовбун, А. И. Михайлов, А. М. Занин, Л. Л. Кашкаров*

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4

**Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН*

Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19

Поступила в редакцию 23.12.2010 г.

Приведены результаты экспериментального исследования регистрационных параметров нового пластикового трекового детектора (п.т.д.) ядерных частиц, представляющего собой модификацию детектора типа CR-39 и обозначенного нами как CZ. Изготовленный в Институте химической физики РАН из аллилдигликолькарбоната ($C_{12}H_{18}O_7$) п.т.д. CZ по сравнению с аналогичным по химическому составу детектором CR-39 обладает существенно лучшими чувствительностью и как динамическими (скорость травления треков и скорость стравливания вещества с поверхности пластинки п.т.д.), так и геометрическими (травимые длина и диаметр треков) регистрационными параметрами. На основе результатов калибровочных экспериментов с использованием α -частиц разной энергии и осколков деления ^{252}Cf , а также ускоренных ионов ^{20}Ne проведена теоретическая оценка порогового значения удельных ионизационных потерь энергии, чувствительности и эффективности регистрации ядерных частиц, начиная с протонов.

ВВЕДЕНИЕ

В 70-х годах прошлого столетия был разработан трековый метод регистрации заряженных частиц с помощью твердотельных трековых детекторов [1]. При этом, наряду со стеклянными и кристаллическими трековыми детекторами, широкое распространение получили пластиковые трековые детекторы (п.т.д.). Одним из наиболее чувствительных к ядрам легких элементов (водород, гелий и т.д.) является п.т.д. с торговой маркой CR-39, изготовленный из мономера аллилдигликолькарбонат ($C_{12}H_{18}O_7$)¹ и впервые описанный в 1978 г. в работе [2]. Однако, как показали последовавшие за этим многочисленные исследования, регистрационные параметры CR-39 [3–5] производства разных фирм имеют большой разброс, что, в конечном счете, влияет на эффективность регистрации ядер с разными зарядом и энергией [6, 7].

Основными трековыми характеристиками п.т.д. являются:

– геометрические параметры – травимые длина L и диаметр D треков;

– скорость травления треков по длине ($V_L = \Delta L/\Delta t$) и по диаметру ($V_D = \Delta D/\Delta t$) в течение определенного промежутка времени Δt , а также скорость удаления поверхностного слоя п.т.д.

($V_G = \Delta H/\Delta t$, где ΔH – толщина поверхностного слоя п.т.д., удаленного в процессе травления);

– длина остаточного пробега частиц разного заряда, соответствующая химически травимой зоне формирования треков $RR_{V(L), (Z)}$, образованной вдоль следа торможения частиц перед их остановкой.

На основе перечисленных параметров для п.т.д. определяются также следующие дополнительные характеристики:

– чувствительность регистрации заряженных частиц с минимальными величинами заряда Z (ядра H и He) и энергии и связанная с этим возможность регистрации нейтронов;

– эффективность регистрации ядер различных элементов (Z) в зависимости от толщины пластинки п.т.д., используемой в эксперименте;

– разрешающая способность п.т.д., позволяющая идентифицировать треки (группы треков), образованные ядрами различных элементов;

– эффективность регистрации ядер отдачи разных элементов (H, C, N, O), входящих в состав вещества данного п.т.д., определяющая, в частности, возможность детектирования высокоэнергетичных нейтронов.

Не менее важными характеристиками являются также:

– минимальная величина флюэнса частиц (как заряженных, так и нейтронов), которая может быть зарегистрирована данным п.т.д.; она

¹ По всем вопросам, связанным с п.т.д. CZ, обращаться по адресу: leokash@mail.ru

определяется уровнем фона п.т.д., слагающегося из: микродефектов, дающих при травлении псевдотреки (трекоподобные структуры), треков от первичных p - и α -частиц, вторичных нейтронов космических лучей и образуемых ими ядер отдачи, а также треков от α -излучения радиоактивных элементов окружающей среды, в частности при α -распаде Rn, накапливаемых в течение всего времени хранения п.т.д. после изготовления;

– максимальная величина флюэнса частиц, которая может быть детектируема с помощью данного п.т.д. и которая зависит главным образом от размера травимых диаметров треков;

– зависимость регистрационных параметров п.т.д. от состава, концентрации и температуры травящего раствора;

– зависимость параметров регистрации треков от температуры окружающей среды при экспозиции п.т.д., например, в условиях открытого космоса (крайне низкая температура) или, наоборот, в условиях повышенной температуры при облучении на ускорителе частиц или в потоке быстрых нейтронов ядерного реактора;

– возможность сохранять радиационные нарушения вдоль следов торможения частиц в течение длительных интервалов времени при определенных температурных условиях.

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения регистрационных характеристик нового, впервые изготовленного нами в 1991 г. п.т.д. CZ [8, 9] в сопоставлении с характеристиками аналогичного по химическому составу п.т.д типа CR-39.

РЕГИСТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ П.Т.Д. CZ

Как было показано выше, основными параметрами треков, характеризующими эффективность травления треков и регистрации заряженных частиц, являются травимые длина L и диаметр D (геометрические параметры), а также скорость травления по длине V_L и по диаметру V_D (динамические параметры). Эти параметры зависят от удельных потерь энергии, изменяющихся вдоль длины остаточного пробега (RR) ядер перед их остановкой.

Химическое травление треков в п.т.д. CZ проводилось в водном растворе 6N NaOH при разных температурах: 45 ± 1 , 55 ± 1 , 65 ± 1 и 70 ± 1 °C – в течение 1–12 ч. Использовалась методика последовательного, ступенчатого травления, описанная в работе [10]. На рис. 1 приведены примеры микрофотографий треков от протонов, α -частиц и осколков нейтронно-индуцированного деления ядер ^{235}U , наблюдаемых на травимой поверхности пленки CZ. Представлены также некоторые, наиболее характерные случаи обнаружения высоко-

радиоактивных “горячих частиц”, выделенных из зараженного радиоактивностью грунта в районе аварии Чернобыльской АЭС [11–14].

Просмотр и измерение параметров треков, а также измерение их поверхностной плотности выполнялись с помощью оптического микроскопа фирмы Карл Цейс типа NU-2 при $900\times$ – $1200\times$ увеличении в условиях проходящего света. Прецизионные измерения и получение изображений треков проводились с помощью CCD-камеры WAT-902B, совмещенной с оптической системой микроскопа. При этом точность измерения линейных размеров координат (X , Y) треков в плоскости травления п.т.д. с применением окуляр-микрометра в зависимости от увеличения равна 0.05–0.1 мкм. По глубине п.т.д. (координата Z) точность измерения составляет около 0.5 мкм, что определяется в основном степенью контрастности изображения фигур травления треков, наблюдаемых при большом увеличении на экране дисплея компьютера.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТРАВЛЕНИЯ V_L И V_G

Скорость V_G в п.т.д. CZ в первом приближении определялась путем измерения диаметров D входных лунок травления треков и скорости травления треков в длину V_L . Исходя из геометрических характеристик треков (рис. 2), скорость удаления вещества с поверхности травления может быть записана в виде:

$$V_G = \frac{D\sqrt{V_L/V_G + 1}}{2t\sqrt{V_L/V_G - 1}}, \quad (1)$$

где D – средняя величина диаметра травимых треков, t – время травления.

Диаметр нормально ориентированных к плоскости поверхности пластинки п.т.д. треков имеет форму круга. Размер входных лунок травления для треков, ориентированных под разными углами и наблюдаемых в виде эллипса, определяется размером малой оси эллипса, направленной перпендикулярно траектории движения ядра (см. рис. 2, ядро B).

Полная травимая длина трека, ориентированного к плоскости поверхности п.т.д. под углом $\theta \geq 20^\circ$, определялась путем измерения его горизонтальной проекции l на плоскость травления и вертикальной проекции h трека, направленной перпендикулярно этой плоскости:

$$L = (l^2 + nh^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления света для пленки CZ. При этом, как указано выше, точность измерения вертикальной составляющей треков не превышает ≈ 0.5 мкм.

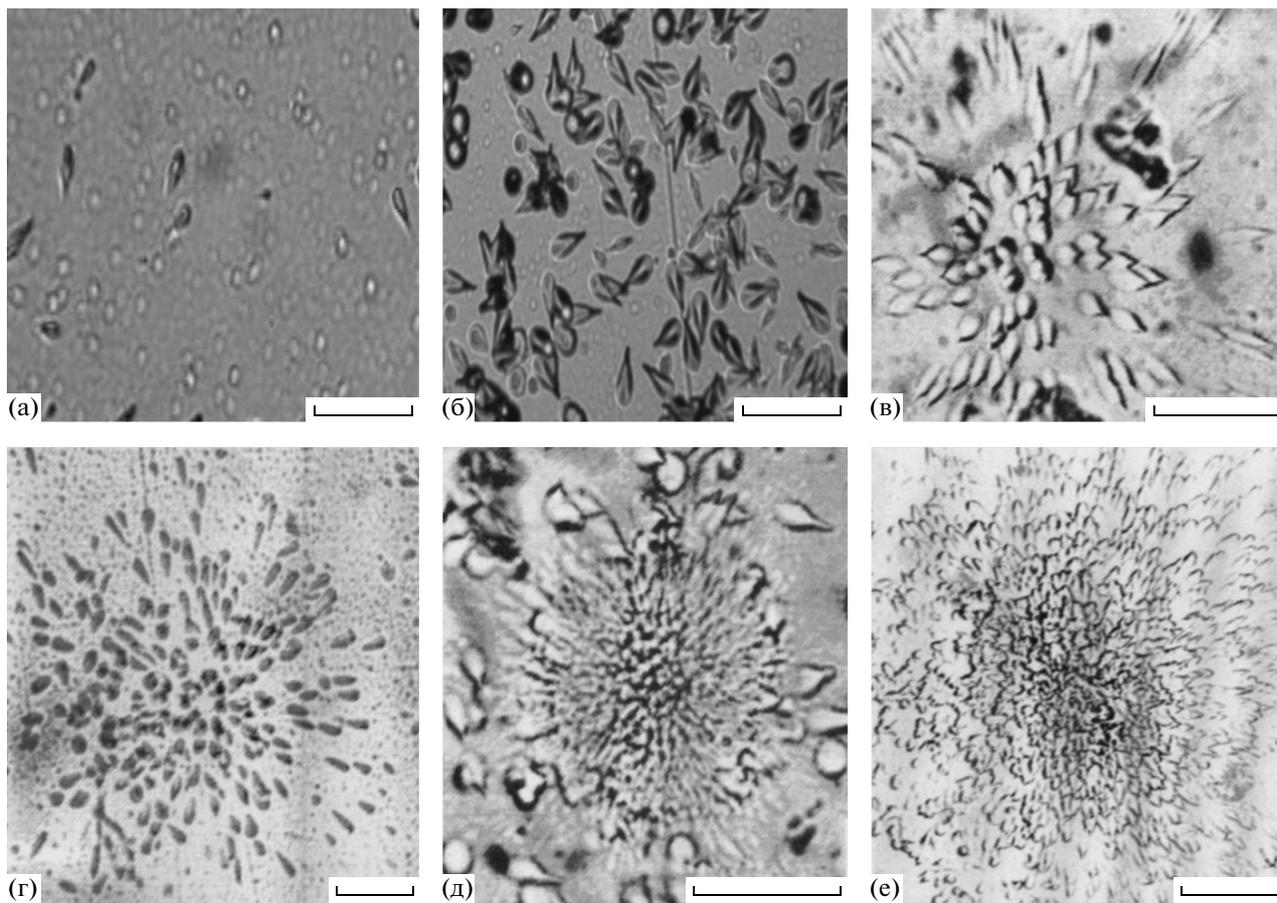


Рис. 1. Микрофотографии травимых в п.т.д. CZ треков: **а** – треки в виде мелких (средняя глубина ~ 5 мкм) овальной формы ямок от протонов отдачи, образующиеся при взаимодействии нейтронов ядерного реактора ($E \leq 2$ МэВ) с ядрами водорода, входящего в состав вещества CZ, на фоне нескольких треков от α -частиц; **б** – треки каплевидной формы от α -частиц и мелкие ямки овальной формы диаметром ≥ 10 мкм от осколков нейтронно-индуцированного деления ядер ^{235}U ; **в** – треки от α -частиц, зарегистрированные для “горячей частицы” размером ≤ 10 мкм (район аварии Чернобыльской АЭС); **г** – треки от α -частиц для “горячей частицы” размером ≤ 50 мкм; **д** – треки с очень высокой плотностью, соответствующие высокоэнергетичным α -частицам, наблюдаемые в центральной зоне зарегистрированной “горячей частицы” размером ~ 80 мкм (район аварии Чернобыльской АЭС); **е** – треки от α -частиц и осколков спонтанного деления, зарегистрированные для “горячей частицы” размером ≤ 30 мкм с высокой концентрацией изотопа ^{239}Pu (район аварии Чернобыльской АЭС). Приведенный на микрофотографиях масштабный отрезок равен 20 мкм.

В случае п.т.д. CZ, когда $V_L/V_G \geq 10$, выражение для расчета V_G упрощается:

$$V_G = D/2t. \quad (3)$$

Значения V_G , полученные для п.т.д. CZ при разных степенях травления и температурах травления треков от α -частиц ^{239}Pu , варьируют в пределах от 1 до 7 мкм/ч. Это обусловлено зависимостью D от величины удельных потерь энергии ядра вдоль своего пути торможения [15, 16], что необходимо учитывать при определении V_G исходя из выражений (1) и (3).

Более точное значение скорости удаления вещества V_G с поверхности пластины CZ, равное 0.75 ± 0.05 мкм/ч, было определено путем измерения изменения толщины пластины в процессе

длительного, в течение 100 ч, ее травления в стандартных условиях (6N NaOH, $T = 70 \pm 1^\circ\text{C}$).

РЕГИСТРАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ П.Т.Д. CZ ДЛЯ ПРОТОНОВ И α -ЧАСТИЦ

Отклик $\varepsilon = [(V_L/V_G) - 1]$, характеризующий эффективность удаления вещества п.т.д. из канала трека, является основным регистрационным параметром. Следует отметить, что указанный параметр является переменной величиной, существенно изменяющейся в зависимости от удельных потерь энергии регистрируемой частицы. Определенный нами для п.т.д. CZ отклик ε на разных этапах травления треков от α -частиц изменяется от ~ 1 до ~ 20 , что в несколько раз превышает значения этого параметра для п.т.д. типа CR-39 от

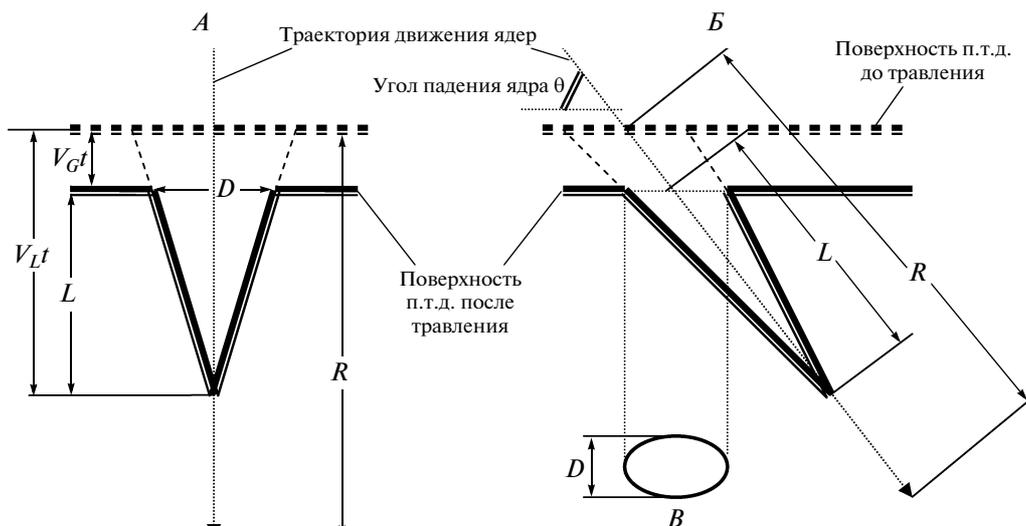


Рис. 2. Геометрические (D , L) и динамические (V_L , V_G) параметры травления треков, образованных нормально направленным к поверхности травления п.т.д. ядром A и ядром B , падающим под углом θ . R — полная длина пробега ядер в п.т.д. Наблюдаемая после травления в течение времени t длина трека для ядра A равна $L = (V_L - V_G)t$, для ядра B — $L = (V_L - V_G/\sin\theta)t$. Диаметр D для ядер B , падающих под углом θ , равен малой оси эллипсовидной лунки входного канала трека.

разных производителей [7, 17]. Так, например, треки от α -частиц с $E = 3$ МэВ, протравленные в течение первых 60 мин в стандартных условиях травления п.т.д. CZ (6N NaOH, $T = 70 \pm 1^\circ\text{C}$), при диаметре $D = 0.6$ мкм имели длину $L \geq 13$ мкм. Треки от тех же α -частиц, травимые в аналогичных условиях в п.т.д. CR-39, имели примерно вдвое больший диаметр ($D = 1.0$ мкм) при длине $L \leq 5$ мкм.

Более точное сопоставление величин отклика для п.т.д. CZ и CR-39 было проведено при травлении длиннопробежных (~ 200 мкм) треков, образованных ускоренными ядрами Ne с энергией 9.1 и 8.6 МэВ/нуклон соответственно.

На рис. 3 представлены микрофотографии треков от ускоренных ядер Ne ($E = 9.1$ МэВ/нуклон), протравленных в течение 6 и 9 ч в 6N NaOH при $T = 70^\circ\text{C}$ в п.т.д. CZ.

Как видно из микрофотографии на рис. 3б, треки от ядер Ne с $E = 9.1$ МэВ/нуклон, протравленные в CZ в течение 9 ч, при $L = 185$ – 190 мкм имеют диаметр $D_{\text{осн}} \approx 6$ мкм перед точкой остановки ядра, что указывает на достижение полной основной части травимой длины трека. Отметим, что диаметры входных лунок на поверхности травления и в конце основной части треков различаются между собой всего на несколько микрометров, что связано с крайне низкой скоростью удаления вещества с ненарушенной поверхности п.т.д.-пластины CZ. Следует заметить, что дальнейшее травление в течение более длительного времени позволяет выявить узкий ($D_{\text{кон}} \leq 2$ мкм) конический участок треков.

На рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости отклика от времени травления треков от ускоренных ядер Ne с энергией 9.1 и 8.6 МэВ/нуклон соответственно для п.т.д. CZ и CR-39.

Из сопоставления данных, представленных на рис. 4, следует, что основной регистрационный параметр ε для п.т.д. CZ в несколько раз выше, чем для CR-39. При последовательном ступенчатом травлении треков от ядер Ne ($E \approx 9$ МэВ/нуклон) в течение 9 ч отношение откликов п.т.д. для CZ и CR-39 составляет порядка 4–5, что свидетельствует о существенно более высокой чувствительности п.т.д. CZ по сравнению с CR-39.

ПОРОГОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИ ТРАВИМЫХ ТРЕКОВ ОТ ПРОТОНОВ И α -ЧАСТИЦ

Пороговая (максимальная) величина энергии ($E_{\text{пор}}$) тормозящихся частиц, при которой начинает формироваться зона радиационно-химических дефектов, способная к избирательному травлению в соответствующем растворе химического реагента, является крайне важной характеристикой п.т.д., позволяющей с помощью измеренных длины и диаметра треков идентифицировать заряд частиц. Модельные расчеты кривых, представленных на рис. 5, выполнены для п.т.д. CZ с использованием программного пакета SRIM 2003 [18]. Экспериментально измеренная в настоящей работе для п.т.д. CZ величина пороговой энергии $E_{\text{пор } \alpha}$, необходимой для формирования основной травимой зоны

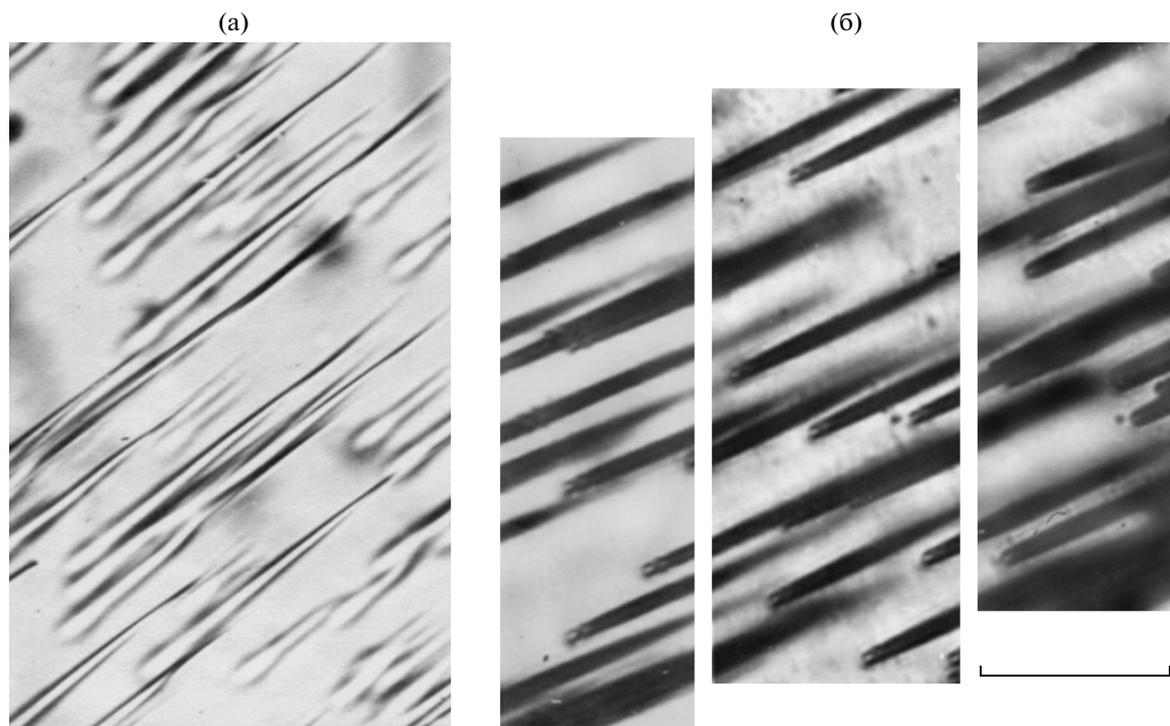


Рис. 3. Микрофотографии треков от ускоренных ядер Ne (9.1 МэВ/нуклон), протравленных в п.т.д. CZ в течение 6 ч (а) и 9 ч (б) в 6N NaOH при $T = 70^\circ\text{C}$. Масштабный отрезок 50 мкм.

треков от α -частиц, равна 3500 ± 200 кэВ/нуклон. Из рис. 5 следует, что соответствующая этому пороговому значению энергии критическая величина удельных ионизационных потерь энергии составляет $(dE/dx)_c = 400 \pm 20$ кэВ \cdot мг $^{-1}$ \cdot см 2 . Исходя

из определенной таким образом величины $(dE/dx)_c$, для протона было получено пороговое значение энергии $E_{\text{пор } p} = 450 \pm 30$ кэВ.

Как видно из рис. 5, максимальные значения полной травимой длины остаточного пробега α -частиц и протонов, отвечающие основной, цилиндрической, части трека, равны соответственно $L_\alpha = 18 \pm 2$ мкм и $L_p = 6 \pm 0.5$ мкм.

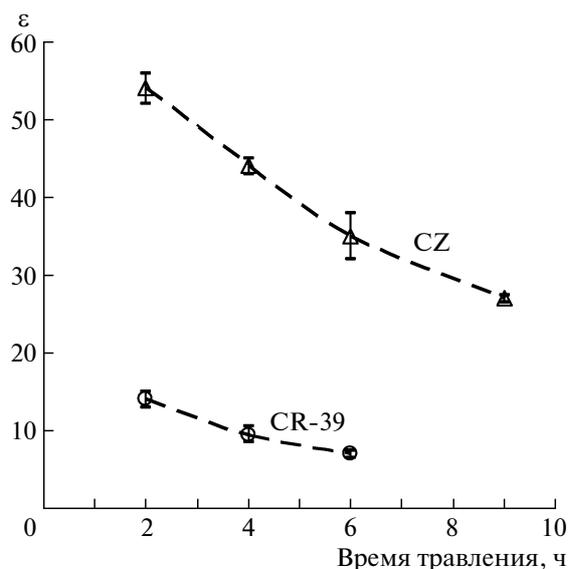


Рис. 4. Изменение отклика ε для п.т.д. CZ и CR-39 в зависимости от времени травления для треков от ядер Ne с энергией 9.1 и 8.6 МэВ/нуклон соответственно.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ α -ЧАСТИЦ РАЗНОЙ ЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ИХ ПАДЕНИЯ НА ПЛОСКОСТЬ ПЛАСТИНЫ CZ

Изучение угловой зависимости эффективности регистрации α -частиц разной энергии проводилось с помощью коллимированного узконаправленного пучка α -частиц от ^{239}Pu -источника. Схема облучения п.т.д. CZ показана на рис. 6.

Энергия α -частиц, достигающих определенных участков поверхности п.т.д., определялась как остаточная энергия этих частиц после пролета расстояния от поверхности электролитически тонкого слоя ^{239}Pu до точки внедрения в наклоненную на определенный угол плоскость CZ. Для $E_{\text{max}} = 5.16$ МэВ (^{239}Pu) вертикальным проекциям трека h , равным 24, 18 и 12 мм, соответствовали значения остаточной энергии E , равные 1.0, 2.0 и

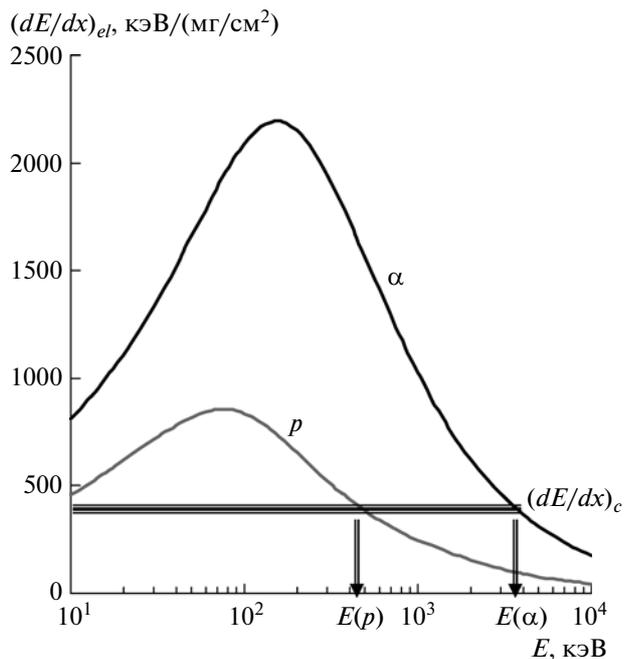


Рис. 5. Удельные потери энергии на ионизацию протонов и α -частиц при их торможении в веществе п.т.д. CZ перед остановкой. Химический состав CZ: $C_{12}H_{18}O_7$, плотность $d = 1.30 \text{ г/см}^3$.

3.0 МэВ. Полученные для этих групп α -частиц данные представлены в графическом виде на рис. 7.

КРИТИЧЕСКИЙ УГОЛ θ_c РЕГИСТРАЦИИ ТРЕКОВ ОТ α -ЧАСТИЦ И ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Критический угол наклона θ_c между траекторией падающего ядра и плоскостью поверхности п.т.д. CZ определялся как средняя величина по результатам измерения геометрии расположения наиболее наклонно ориентированных к плоскости поверхности п.т.д. треков, наблюдаемых для коллимированного пучка α -частиц и осколков деления ^{252}Cf . Величина θ_c в первом приближении оценивалась из соотношения

$$\theta_c = \arcsin(V_G/V_L). \quad (4)$$

Однако на практике, при наблюдении треков в оптический микроскоп, для измерения длины горизонтальной проекции x необходимо определить большую полуось эллипса входной лунки травления трека. Минимальное значение X_{\min} , которое может быть еще зарегистрировано, составляет $\sim 0.5 \text{ мкм}$. Для учета этого фактора выражение (4) записывается в виде

$$\theta_c = \arcsin[(V_G/V_L) + (X_{\min}/R_{Z,E})], \quad (5)$$

где $R_{Z,E}$ – полная травимая длина трека для ядра с зарядом Z и энергией E .

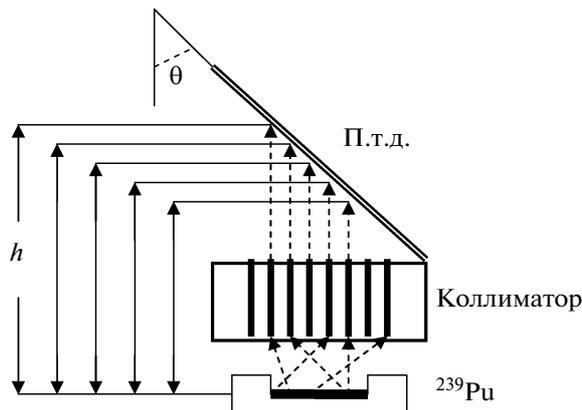


Рис. 6. Схема облучения п.т.д. CZ коллимированным пучком α -частиц от ^{239}Pu -источника в эксперименте по изучению угловой зависимости эффективности регистрации α -частиц разной энергии.

Таким образом, θ_c для п.т.д. одного и того же типа имеет разные значения для ядер с одинаковым Z в зависимости от их энергии E . При некотором минимальном значении энергии E_{\min} величина θ_c также достигает своего наименьшего значения $\theta_{c \min}$, что необходимо учитывать при регистрации ядер с различной энергией. Из выражения (4) следует, что эффективность регистрации треков тем ниже, чем меньше значение V_L . Очевидно, что при $V_L \approx V_G$ независимо от угла наклона θ треки не наблюдаются. Отсюда следует, что как абсолютная величина V_L , так и ее отношение к V_G име-

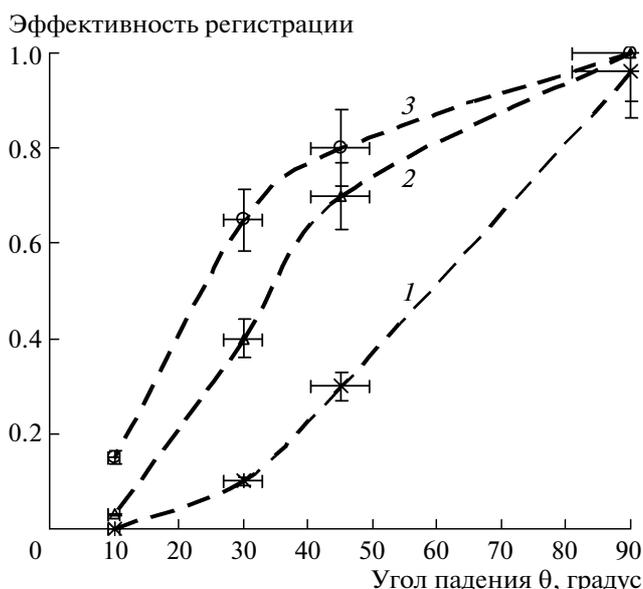


Рис. 7. Эффективность регистрации п.т.д. CZ α -частиц с энергией $E = 1$ (1); 2 (2) и 3 МэВ (3) в зависимости от угла их падения на плоскость детектора.

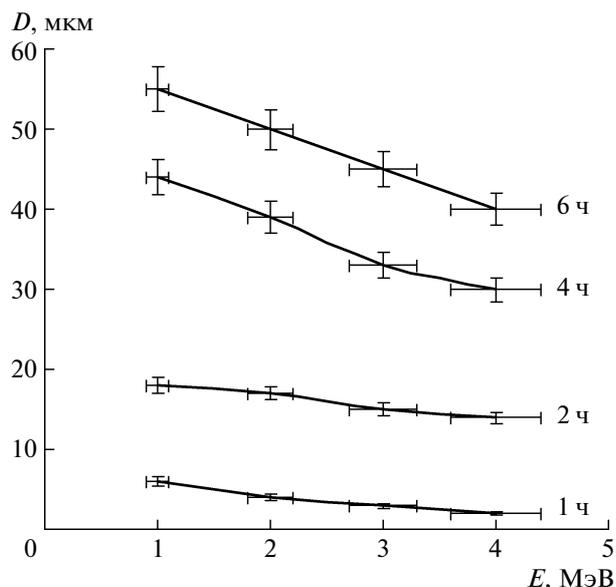


Рис. 8. Изменение диаметра лунок для треков от α -частиц ^{239}Pu в зависимости от их энергии в п.т.д. CR-39 при разных временах травления (цифры у кривых) в водном растворе 6N NaOH при температуре $T = (70 \pm 1)^\circ\text{C}$.

ют большое значение для регистрации и измерения параметров треков заряженных частиц.

Прецизионные измерения показали, что для α -частиц с энергией, превышающей 3 МэВ, $\theta_{c \min}$ для п.т.д. CZ составляет $5^\circ\text{--}7^\circ$, что приводит к 10–15%-ному увеличению эффективности их регистрации при использовании этого п.т.д. по сравнению с CR-39.

ДИАМЕТР ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В П.Т.Д. CZ

Для сопоставления динамики травления треков в п.т.д. CZ и CR-39, производимых разными фирмами [7, 17], нами измерены параметры треков от нормально ориентированного с помощью микроколлиматора пучка α -частиц от ^{239}Pu -источника с $E_{\max} = 5.16$ МэВ. α -частицы с более низкой энергией (вплоть до 0.5 МэВ) получали, располагая источник и облучаемую поверхность пластины CZ на определенных расстояниях. Результаты измерения диаметров треков от α -частиц с разной энергией, травимых в течение определенных промежутков времени в п.т.д. CR-39, представлены на рис. 8.

Результаты измерения диаметров D входных отверстий треков в п.т.д. CZ от α -частиц разной энергии (травление проводилось в водном растворе 6N NaOH при $T = (65 \pm 1)^\circ\text{C}$ в интервале времен травления от 2 до 9 ч) приведены на рис. 9. После первого часа травления (при просмотре треков без возможности их точного измерения)

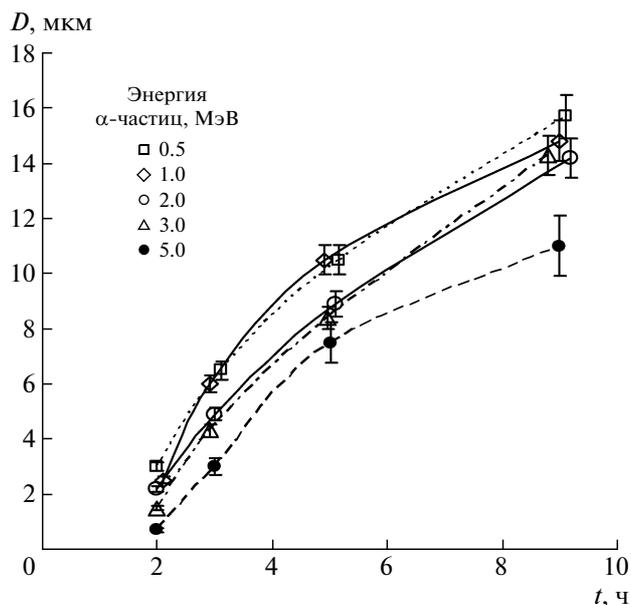


Рис. 9. Диаметр лунок при травлении треков от α -частиц ^{239}Pu с разной энергией в п.т.д. CZ в зависимости от времени травления в водном растворе 6N NaOH при температуре $T = (65 \pm 1)^\circ\text{C}$.

на поверхности CZ, облученной α -частицами с энергией 0.5–1 МэВ, наблюдались только очень мелкие ($D \leq 1$ мкм) ямки-лунки, характерные для начальной стадии травления треков от α -частиц, плотность которых соответствовала их потоку при облучении. Как видно из графика, например для α -частиц с $E \leq 3$ МэВ, после травления в течение девяти часов диаметр лунок составил 15 ± 1 мкм, при-

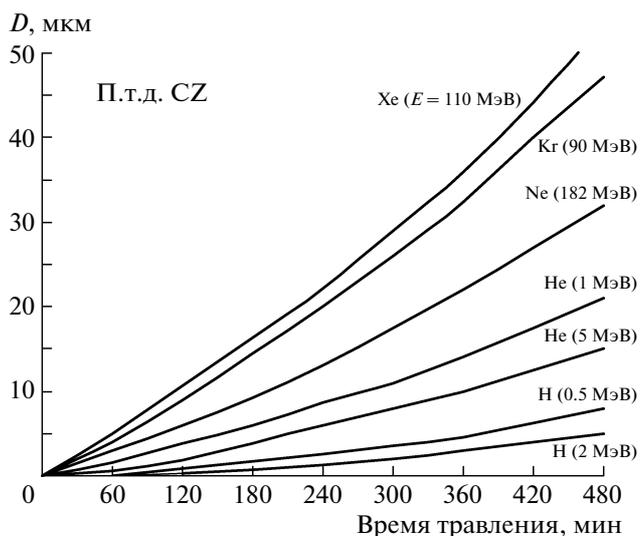


Рис. 10. Диаметр треков, травимых в п.т.д. CZ, в зависимости от времени травления для ядер различных элементов с разной энергией.

Таблица 1. Параметры треков от ядер Ne с энергией $E = 8.6$ и 9.1 МэВ/нуклон соответственно для п.т.д. CR-39 разных производителей [7, 17] и CZ

Время травления, ч	D , мкм		L , мкм		V_{TR} , мкм		ε	
	CR-39*	CZ**	CR-39	CZ	CR-39	CZ	CR-39	CZ***
2	2–4	2–4	60 ± 5	82 ± 3	30 ± 2.5	41 ± 1.5	14 ± 1	54 ± 2
4	5–8	5–6	85 ± 10	135 ± 5	21 ± 2.5	34 ± 1	9.5 ± 1	44 ± 1
6	8–12	8–10	95 ± 5	160 ± 10	16 ± 1	27 ± 2	7 ± 0.5	35 ± 3
9	–	13–15	–	187 ± 3	–	21 ± 0.3	–	27 ± 0.5

* Для CR-39 трех производителей [7, 17] верхний предел величины D соответствует скорости удаления слоя вещества п.т.д. с поверхности травления $V_G \approx 2$ мкм/ч.

** Для п.т.д. CZ указан интервал значений D , экспериментально измеренных для 100 треков.

*** Отклик регистрации для п.т.д. CZ рассчитан для $V_G = 0.75$ мкм/ч.

чем, около 7 мкм относится на счет травления радиационно не нарушенного вещества CZ.

Результаты измерения диаметров треков, травимых в CZ от ядер некоторых элементов (травление проводилось в тех же условиях в течение 60–480 мин), представлены на рис. 10. Отметим, что треки от протонов отдачи, образуемых при взаимодействии быстрых нейтронов ($E \sim 1$ МэВ) с ядрами водорода, входящими в состав вещества п.т.д. CZ, имеют небольшие размеры, $D \sim 1$ –2 мкм, после первых 120–180 мин травления. Треки с близкими к ним диаметрами наблюдаются для α -частиц с энергией $E \sim 0.5$ –1 МэВ. Однако при дальнейшем травлении диаметры треков от протонов и α -частиц независимо от их энергии становятся разными. Как видно из графика, после травления в течение ~420–480 мин отношение диаметров треков от протонов и α -частиц составляет в среднем ~3. При этом максимальная травимая величина диаметра треков от протонов не превышает 7 мкм.

Из приведенных на рис. 10 зависимостей диаметров треков для ядер разных элементов от времени травления, в частности, следует, что прецизионное измерение диаметров треков в п.т.д. CZ при их поэтапном травлении позволяет регистрировать и идентифицировать ядра различных элементов, энергия которых соответствует области превышения пороговой величины удельных ионизационных потерь.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные нами для п.т.д. CZ результаты измерений параметров треков от ускоренных ядер Ne в сопоставлении с результатами аналогичных измерений, выполненных для CR-39, изготовленных разными фирмами [7, 17], приведены в табл. 1 и на рис. 4.

Можно отметить следующие существенные различия между параметрами травления треков

от ускоренных ядер Ne в п.т.д. CR-39 и CZ (см. табл. 1).

1. При незначительном различии диаметров лунок входных отверстий треков на поверхности травления п.т.д. для каждого интервала времени травления длины треков L в CZ примерно в 1.5 раза превышают L в CR-39, что приводит к соответствующему изменению соотношения скоростей травления треков V_L в этих п.т.д.

2. Экспериментально измеренные значения отклика п.т.д. $\varepsilon = (V_L/V_G) - 1$ при травлении треков от ядер Ne с энергией $E = 9.1$ МэВ/нуклон для CZ в 3–5 раз выше, чем для CR-39 при травлении треков от ядер Ne с энергией $E = 8.6$ МэВ/нуклон. Расчет величины V_L/V_G проводился с использованием выражения

$$V_L/V_G = 2\{(D/2)^2 + L^2\}^{1/2}/D. \quad (6)$$

Приведенные данные указывают на существенно более высокую чувствительность регистрации ядер легких элементов с помощью п.т.д. CZ по сравнению с CR-39.

В табл. 2 приведены результаты измерения параметров треков, образованных ядрами различных элементов в п.т.д. CZ.

Анализ полученных результатов экспериментального исследования регистрационных характеристик нового п.т.д. CZ, аналогичного по химическому составу п.т.д. CR-39, показал:

1) геометрические параметры треков, травимых в растворе 6N NaOH в течение времени, оптимального для выявления полной травимой длины треков при соответствующих величинах диаметров треков (см. рис. 10), позволяют, в частности, проводить четкое разделение и регистрацию ядер водорода и гелия, максимальная травимая длина основной части треков для которых равна соответственно $L_\alpha = 18 \pm 2$ мкм, $L_p = 6 \pm 0.5$ мкм;

2) соотношение скоростей травления треков в длину и стравливания вещества с поверхности п.т.д. для выбранных оптимальных условий травления достигает ≈ 60 в случае травления треков от

Таблица 2. Регистрационные характеристики п.т.д. CZ для ядер различных элементов в зависимости от их энергии и температуры травящего раствора (6N NaOH)

Ядра	E , МэВ	R^{**} , мкм	D^{***} , мкм			V_L , мкм/ч	
			45°C	55°C	(65–70)°C	55°C	70°C
Протоны*	0.2–1.0	2–7	0.5–1	2–3	4–5	~8	~10
α -частицы ^{239}Pu ($E = 5.1$ МэВ)	1.1–5.0	4.5–30	1–0.5	4–5	25–30	10–12	15–20
Ускоренные ядра $^{20}\text{Ne}_{10}$ ($E_{\text{Ne}} \sim (100–180)$ МэВ)	182	190	–	–	6–8	–	60–20****
Осколки деления ^{252}Cf	~1.0	0.5–0.7	3–5	10–12	20–25	–	–

* Треки от протонов отдачи при облучении п.т.д. CZ быстрыми нейтронами.

** R – полная длина травления треков, определяемая как $R = L_{\text{изм}} + L_h$, где $L_{\text{изм}}$ – измеренная длина протравленного трека, L_h – длина пробега ядра в слое п.т.д., удаленном при травлении.

*** Значения D получены для α -частиц с $E = 2$ МэВ при травлении в течение 3 ч.

**** Величина $V_L \approx 60$ мкм/ч наблюдается в течение первых 2–3 ч травления, $V_L \approx 20$ мкм/ч соответствует средней скорости травления полной длины треков $L \approx 190$ мкм при $E \approx 180$ МэВ.

ускоренных ионов ^{20}Ne , что указывает на возможность проведения прецизионных измерений заряда ядер тяжелых элементов в составе космического излучения;

3) сравнительно малые значения D при полной протравленной длине треков от α -частиц позволяют регистрировать поверхностную плотность треков до значений $\rho_{\text{max}} = 1 \cdot 10^8$ трек \cdot см $^{-2}$;

4) фоновые треки, образованные главным образом протонами отдачи от взаимодействия n и p космических лучей, для CZ-пленок, изготовленных в 1991 г., но находившихся в течение всего этого времени в специальной экранирующей от космического излучения “низкофоновой” камере, составили $\rho_{\text{фон}} \leq 100$ трек \cdot см $^{-2}$;

5) низкий фон, высокие чувствительность и разрешающая способность пленок CZ при регистрации треков от протонов позволяют измерять достаточно низкие уровни потока быстрых нейтронов, вплоть до $\sim 10^3$ см $^{-2}$;

6) с помощью α -частиц с энергией $\sim 1–5$ МэВ методом α -радиографии возможно определение содержания природных радиоэлементов (изотопов U и Th радиоактивных рядов) в очень широком интервале, от $\sim 10^{-3}$ до $\sim 10^{-10}$ г/г;

7) сравнительно высокая скорость травления треков в длину при крайне низкой скорости травления радиационно не нарушенного вещества CZ указывают на возможность применения описанного п.т.д. для изучения зарядового и энергетического спектра ядер, образующихся в ядерных реакциях;

8) сопоставление откликов ϵ , определенных для п.т.д. CR-39 от трех разных производителей и одного изготовленного нами п.т.д. CZ при регистрации ускоренных ядер Ne ($E \approx 9$ МэВ/нуклон),

показало, что величина ϵ для CZ в 4–5 раз превышает значение этого параметра для CR-39.

Таким образом, представленные в данной работе характеристики нового п.т.д. CZ указывают на его более высокую регистрационную чувствительность по сравнению с аналогичным по химическому составу п.т.д. CR-39, что имеет большое значение при проведении ядерно-физических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fleisher R.L., Price P.B., Walker R.M.* // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1965. V. 15. P. 1.
2. *Cartwright B.G., Shirk E.K., Price P.B.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1978. V. 153. P. 457.
3. *Дюррану С., Балл Р.* Твердотельные ядерные детекторы. Пер. с англ. / Под ред. В.П. Перельгина. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. *Benton E.V., Ogura K., Frank A.L. et al.* // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1986. V. 12. № 1. P. 79.
5. *Khan H.A., Brandt R., Khan N.A., Jamil K.* // Nucl. Tracks. 1983. V. 7. № 3. P. 129.
6. *Khan F.H., Matiullah N.A.* // Radiat. Meas. 2001. V. 33. № 1. P. 129.
7. *Головченко А.Н., Джолос Л.В., Третьякова С.П.* // Труды Международного рабочего совещания “Твердотельные трековые детекторы ядер и их применения”. Дубна: ОИЯИ, 6–8 февраля 1990. С. 53.
8. *Kashkarov L.L., Stovbun S.V., Pereygin V.P.* // Rep. on the Workshop SSNTD E7-93-61. Dubna: JINR, 1992. P. 44.
9. *Kashkarov L.L., Vlasova I.E.* // Radiat. Meas. 1995. V. 25. № 1–4. P. 177.
10. *Kashkarov L.L., Stovbun S.V., Pereygin V.P.* // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1993. V. 22. № 1–4. P. 129.
11. *Kashkarov L.L., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Tcherchezian V.O.* // Radiat. Meas. 1995. V. 25. № 1–4. P. 413.

12. *Kashkarov L.L., Tchercejian V.O., Kalinina G.V. et al.* // Radionuclides and Heavy Metals in Environment. NATO Science Series. V. IV. Earth and Environmental Sciences. V. 5. / Eds. M.V. Frontasyeva, V.P. Perelygin, P. Vater. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2001. P. 43.
13. *Kashkarov L.L., Kalinina G.V., Perelygin V.P.* // Radiat. Meas. 2003. V. 36. № 2. P. 529.
14. *Власова И.Э., Калмыков С.Н., Кашкаров Л.Л. и др.* // Электронный научно-информационный журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”. 2004. № 1(22); URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1/geoecol-4.pdf
15. *Katz R., Kobetich E.J.* // Phys. Rev. 1968. V. 170. P. 401.
16. *Kvasnicka J.* // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1986. V. 11. № 1–2. P. 81.
17. *Birkholz W., Stetsenko S.G., Perelygin V.P.* // International Workshop “Solid State Nuclear Track Detectors and Their Applications”. Dubna: JINR, 6–8 February 1990. P. 59.
18. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. N.Y., Oxford: Pergamon Press. 1985.