GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2015 VOLUME 6 ISSUE 4 PAGES 519–553 ISSN 2078-502X

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0192

CREATING THE KULTUK POLYGON FOR EARTHQUAKE PREDICTION: VARIATIONS OF ($^{234}U/^{238}U$) AND $^{87}Sr/^{86}Sr$ IN GROUNDWATER FROM ACTIVE FAULTS AT THE WESTERN SHORE OF LAKE BAIKAL

S. V. Rasskazov[1, 2], E. P. Chebykin[1, 3], A. M. Ilyasova[1], E. N. Vodneva[1, 3], I. S. Chuvashova[1, 2], S. A. Bornyakov[1, 2], A. K. Seminsky[1], S. V. Snopkov[2], V. V. Chechel'nitsky[4], N. A. Gileva[4]

[1] *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*
[2] *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*
[3] *Limnological Institute, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*
[4] *Baikal Branch of Geophysical Survey, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract: Introduction. Determinations of ($^{234}U/^{238}U$) in groundwater samples are used for monitoring current deformations in active faults (parentheses denote activity ratio units). The cyclic equilibrium of activity ratio $^{234}U/^{238}U \approx (^{234}U/^{238}U) \approx \gamma \approx 1$ corresponds to the atomic ratio $\approx 5.47 \times 10^{-5}$. This parameter may vary due to higher contents of ^{234}U nuclide in groundwater as a result of rock deformation. This effect discovered by P.I. Chalov and V.V. Cherdyntsev was described in [*Cherdyntsev, 1969, 1973; Chalov, 1975; Chalov et al., 1990; Faure, 1989*]. In 1970s and 1980s, only quite laborious methods were available for measuring uranium isotopic ratios. Today it is possible to determine concentrations and isotopic ration of uranium by express analytical techniques using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [*Halicz et al., 2000*; *Shen et al., 2002; Cizdziel et al., 2005; Chebykin et al., 2007*]. Sets of samples can be efficiently analysed by ICP-MS, and regularly collected uranium isotope values can be systematized at a new quality level for the purposes of earthquake prediction. In this study of ($^{234}U/^{238}U$) in groundwater at the Kultuk polygon, we selected stations of the highest sensitivity, which can ensure proper monitoring of the tectonic activity of the Obruchev and Main Sayan faults. These two faults that limit the Sharyzhalgai block of the crystalline basement of the Siberian craton in the south are conjugated in the territory of the Kultuk polygon (Fig 1). Forty sets of samples taken from 27 June 2012 to 28 January 2014 were analysed, and data on 170 samples are discussed in this paper.

Methods. Isotope compositions of uranium and strontium were determined by methods described in [*Chebykin et al., 2007; Pin et al., 1992*] with modifications. Analyses of uranium by ISP-MS technique were performed using an Agilent 7500ce quadrapole mass spectrometer of the Ultramicroanalysis Collective Use Centre; analyses of strontium were done using a Finnigan MAT 262 mass spectrometer of the Baikal Analytical Centre for Collective Use. A natural uranium isotope standard (GSO 7521-99, Ural Electrochemical Plant, Novouralsk, Russia) and a strontium isotope standard (NBS 987) were used for quality control of the measurements.

Results. The Kultuk polygon occupies large valleys of the Kultuchnaya, Angasolka, Talaya rivers and small valleys of the Medlyanka and Vorotny streams. The erosion basis of these valleys corresponds to the surface of Lake Baikal. In the valleys, there are several testing sites, including Staraya Angasolka, Slyudyanka, Vorotny, and Medlyanka. In the Kultuchnaya river valley, there are two sites, Tigunchikha and Verbny. Another two sites, Shkolny and Zemlyanichny, are located on slopes where no permanent water streams are available (Fig. 2). Measured U concentrations and ($^{234}U/^{238}U$) in water from the sites of the Kultuk polygon are placed in Table 1.

Analysis and discussion of results. In water from an active fault, ($^{234}U/^{238}U$) depends on current deformation. The higher is the strain that causes fracturing, the higher is ($^{234}U/^{238}U$). The isotope composition of Sr sufficiently depends on the chemical weathering of rocks. The primary composition may be preserved in central parts of rock minerals and is detectable after preliminary treatment of an altered rock by HCl [*Rasskazov et al., 2012*]. In general, isotope ratios of U and Sr in groundwater and surface water depend on the composition of host rocks, weathering, and alkalinity.

Dissolved uranium migrates as uranyl-ion (UO_2^{2+}) characterised by its highest degree of oxidation (+6). Reduced forms of U(+4) are practically water-insoluble. Therefore, an indirect assessment of oxidation-reduction properties of the medium can be based on uranium concentrations. For the Kultuk polygon, surface water with low ($^{234}U/^{238}U$) is divided by uranium content into two groups, with anomalously low (below 0.009 mkg/l), and medium (~0.5 mkg/l) concentrations of uranium (components from the Medlyanka river and Kultuchnaya river, respectively). The U abundances reflect relatively reduced conditions in group 1 and more oxidized in group 2. The higher ($^{234}U/^{238}U$) in the

surface water with intermediate concentrations of uranium (0.009–0.500 mkg/l) may indicate the admixture of a groundwater component (Fig. 3). Figure 4 shows relations between surface water and groundwater components in the Kultuk polygon in terms of U content.

In Figure 5, the field of data points of U and Sr isotope ratios in groundwater from the Kultuk polygon is contoured by curved lines that meet with each other at compositions corresponding to the end members E ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.7205, $^{234}U/^{238}U$=1.0) and NE ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.70534, $^{234}U/^{238}U$=3.3). Uranium ratios of the former and the latter components show equilibrium and the most nonequilibrium compositions, respectively. The field is characteristic of water samples from the rocks of the southern suture zone of the Siberian craton. Shift of the data points of water from stations 26 and 1310 to the right of this data field (i.e. with relative increasing $^{87}Sr/^{86}Sr$) is due to lateral transition from the rocks of the suture zone to the Archean rocks of the Sharyzhalgai block (Fig. 6). The isotope systematics of uranium and strontium in the strongly nonequilibrium uranium segment is supplemented by the systematics of uranium in ($^{234}U/^{238}U$) vs. 1/U diagram (Fig. 7). The U composition in water from station 40 reflects a combination of processes that take place at station 27 (i.e. in the central part of the deformation system) and at station 38 (i.e. at its periphery). Approximately equal contents of uranium at the three above-mentioned stations may reflect similar oxidization levels of the medium.

In the Southern Baikal basin, the Irkutsk Seismic Station recorded an earthquake of class 11.2 on 08 January 2013 [*Map…, 2013*]. The earthquake epicentre was located near Listvyanka settlement (51.85° N, 105°16 E), at a distance of ~100 km from Kultuk settlement eastward of the Obruchev fault. On 24 April 2013, an earthquake of class 10 took place near Kultuk settlement. Another seismic event occurred on 07 June 2013 (Fig. 8). During the monitoring period, nine maximums and ten minimums of ($^{234}U/^{238}U$) were recorded at station 9, i.e. nine full cycles can be identified (Table 2). At station 9, amplitudes of the cycles exceed the measurement error by a factor of 2 to 4. In Fig. 9, at the curve showing temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) in water from station 9, deviations from similar curves for stations 11 and 8 are not marked.

Curves of temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) in water from stations 40 and 27 are shown in Figure 10. At the first station (diagram *a*), there were three time intervals of monitoring: (1) 12 April 2013 to 04 July 2013, (2) 04 July 2013 to 21 October 2013, and (3) 21 October 2013 to 17 January 2014. The initial and final intervals are similar and show an abrupt decline of the curve with a clearly manifested drop of ($^{234}U/^{238}U$) in the middle part, a minimum and subsequent rise of the curve. The time interval between the compared periods of observation lasted 5–6 months. This middle interval marked a rapid increase of the average values of ($^{234}U/^{238}U$) in the range from 2.34 to 2.47 activity units with the average rate of about 0.2 units per year. In the curve of station 27, there is also a downward segment with a drop, a minimum and subsequent rise of the curve, which is partly coincident in time with the initial segments for station 40. Correlation in time is revealed between the earthquakes that occurred in the Kultuk polygon and the drops in the curves for the above-mentioned stations. Considering the shape of the final segment of the curve based on observations at station 40, it could be expected that the drop in the downward curve should have been associated with earthquakes. However, no earthquakes took place. In this regard, attention should be paid to the fact that a concurrent drop lacks in the curve for station 27. This suggests that an earthquake would happen only in a case of co-seismic ($^{234}U/^{238}U$) drops at both stations.

Seismic processes are controlled by triggers that provide the synchronization effect. Self-organization processes may be the cause of its manifestation. Intervals of synchronization of oscillations (similar to foreshock activation) are indicators of the unstable state of a seismic region [*Sobolev et al*., *2005*]. Similar information of the transition to the pre-seismogenic state can be obtained by analysing variations of ($^{234}U/^{238}U$) in water from active faults. In the initial monitoring stage, the deformation system of the Kultuk polygon (stations 8, 9 and 11) developed slowly, 110–170 days per cycle. The first indicators of the pre-seismogenic state in the polygon were observed as a coincidence of the minimums in the cycles of all the stations on 16 March 2013. The first seismic event took place on 24 April 2013, i.e. 39 days after all the maximums coincided. In the period of the pre-seismogenic state, relatively short cycles were manifested. The second seismic event occurred on 07 June 2013. It was reflected by the coincidence of the minimums of short cycles at stations 8, 9 and 40 (Fig. 11). The entire monitoring period at the Kultuk polygon can be divided into two time intervals starting from (1) 10 July 2012, and (2) 07 August 2013. The first time interval includes the preparation and occurrence of seismic events of class 10 in the polygon. In the second time interval, the deformation system was further developed, and a new seismogenic state became possible. The time interval from 10 July 2013 to 07 August 2013 includes three stages starting from (1) 10 July 2012, (2) 10 January 2013, and (3) 12 April 2013 (Fig. 12). Higher strain values along the line from station 8 to station 9 were accompanied by the occurrence of deformation along the line from station 40 to station 47 (submeridional direction at 14°), which resulted in the synchronization of ($^{234}U/^{238}U$) at these stations (Fig. 13). At the background of the chaotic state of the monitoring system of the Kultuk polygon, it is possible to distinguish sequential self-organization phases from *a* to *e* as evidenced by the azimuthal synchronization of the stations. The spatial development of the recorded processes was represented the sequential seismogenic activation of the western termination of the Obruchev fault (Fig. 14).

From the analyses of temporal variations of U concentrations (Fig. 15), we infer that the dynamics of uranium ingress into water was different at stations 9 and 8. In the initial monitoring stage, the background extremely high values of ($^{234}U/^{238}U$) and concentrations of uranium were inconsistent at stations 9 and 8. Later on, at station 9, episodes of the high mobility of uranium from the deformation zone alternated with episodes of the high mobility of uranium from the oxidation zone. At station 8, in the period from 26 October 2012 to 04 July 2013, uranium impulses took place occasionally in the deformation zone, and a few were combined with earthquakes of class 9 or 10. From 07 August 2013, the above-mentioned impulses were replaced by uranium impulses from the oxidation zone. At this stage, an anomalous ingress of uranium was recorded.

Conclusion. To validate the system of monitoring stations in the Kultuk polygon for earthquake prediction, spatial variations of ($^{234}U/^{238}U$) both in groundwater and surface water were studied. On sites of the tectonically stable areas, it was found that components of the surface runoff had admixtures of ground water components from the near-surface water sources. On sites located at active faults, surface runoff components had admixtures of groundwater

components from the deformation zone and oxidation zone. On sites located at active faults whereat permanent water streams lacked, the components from the deformation zone contained admixture of near-surface ground water. The Sr–U-isotopic systematics of groundwater at the Kultuk polygon was validated. Stations with high ($^{234}U/^{238}U$) (2.0–3.3 activity units) and low $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.705341–0.712927) were selected for monitoring that lasted from 27 June 2012 to 28 January 2014. It was observed that ($^{234}U/^{238}U$) fluctuated in time, the duration of cycles and amplitudes of ($^{234}U/^{238}U$) fluctuations were variable, and the cycles of ($^{234}U/^{238}U$) in water were synchronized in the lines of the monitoring stations in the sublatitudinal and submeridional direction at the time intervals when seismic shocks occurred at the Kultuk polygon. The basic scenario of ($^{234}U/^{238}U$) variations in groundwater, recorded in the Kultuk polygon during the monitoring session, was examined in connection with the seismogenic activation of the western termination of the Obruchev fault. The SSE termination of the Main Sayan fault did not reveal any evidence on current tectonic deformations. The scenario of the reactivating Obruchev fault can be used for prediction of potential earthquakes in the Southern Baikal basin.

Key words: Baikal, active faults, earthquake prediction, groundwater, $^{234}U/^{238}U$, $^{87}Sr/^{86}Sr$

Recommended by V.S. Imaev

For citation: *Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A.* 2015. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}U/^{238}U$) and $^{87}Sr/^{86}Sr$ in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.

Для цитирования: *Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А.* Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 4. С. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.

Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала

С. В. Рассказов[1, 2], Е. П. Чебыкин[1, 3], А. М. Ильясова[1], Е. Н. Воднева[1, 3], И. С. Чувашова[1, 2], С. А. Борняков[1, 2], А. К. Семинский[1], С. В. Снопков[2], В. В. Чечельницкий[4], Н. А. Гилева[4]

[1] *Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*
[2] *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*
[3] *Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия*
[4] *Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН, Иркутск, Россия*

Аннотация: Введение. Для отслеживания текущих деформаций в зонах активных разломов перспективны определения ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах (скобки обозначают единицы активности). Циклическое равновесие отношения активностей $^{234}U/^{238}U \approx (^{234}U/^{238}U) \approx \gamma \approx 1$ соответствует атомному отношению $\approx 5.47 \times 10^{-5}$. Вариации этого параметра могут быть обусловлены эффектом Чалова–Чердынцева – обогащением подземных вод нуклидом ^{234}U в результате деформаций пород [*Cherdyntsev, 1969, 1973; Chalov, 1975; Chalov et al., 1990; Faure, 1989*]. В 1970–1980-х гг. использовались трудоемкие методы измерения изотопных отношений урана. В настоящее время для измерений концентраций и изотопных отношений урана разрабатываются экспрессные методики с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС) [*Halicz et al., 2000; Shen et al., 2002; Cizdziel et al., 2005; Chebykin et al., 2007*]. Этим методом могут анализироваться серии проб, поэтому проблема сейсмопрогностического значения урановой изотопной систематики подземных вод в свете режимных наблюдений может быть выведена на качественно новый уровень. Настоящая работа по измерениям ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах преследует цель – выбрать на Култукском полигоне наиболее чувствительные станции для наблюдений активности Обручевского и Главного Саянского разломов, ограничивающих с юга Шарыжалгайский выступ кристаллического фундамента Сибирского кратона и

сочленяющихся между собой на этой территории (рис. 1). Использованы данные, полученные для 170 проб из сорока серий, отобранных в период с 27 июня 2012 г. до 28 января 2014 г.

Методика. Для определения изотопного состава урана и стронция в природных водах использовали модифицированные методики [*Chebykin et al., 2007; Pin et al., 1992*]. Аналитические исследования урана проводили методом ИСП–МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ», аналитические исследования стронция – на масс-спектрометре Finnigan MAT 262 Байкальского аналитического центра коллективного пользования. Для контроля качества измерений применяли стандартный образец изотопного состава природного урана ГСО 7521-99 (Уральский электрохимический комбинат, г. Новоуральск) и стандартный образец изотопного состава стронция NBS 987.

Результаты. Култукский полигон охватывает сравнительно крупные бассейны речек Култучная, Ангасолка и Талая, а также небольшие бассейны ручьев Медлянка и Воротный. Базису эрозии в этих бассейнах соответствует зеркало оз. Байкал. В бассейнах выделяются участки опробования: Старая Ангасолка, Слюдянка, Воротный, Медлянка, в бассейне р. Култучная – два участка, Тигунчиха и Вербный. Еще два участка, Школьный и Земляничный, находятся на склонах, лишенных постоянных водотоков (рис. 2). Результаты измерений концентраций U и ($^{234}U/^{238}U$) в водах участков Култукского полигона приведены в табл. 1.

Анализ результатов и обсуждение. В воде активных разломов ($^{234}U/^{238}U$) зависит от текущих деформаций. Чем выше деформации, вызывающие образование трещин, тем выше ($^{234}U/^{238}U$). Изотопный состав Sr существенно зависит от химического выветривания породы. Его первичный состав может сохраниться в центральных частях минералов породы и выявляется посредством предварительной обработки пробы измененной породы раствором соляной кислоты [*Rasskazov et al., 2012*]. В целом изотопные отношения U и Sr в подземных и поверхностных водах меняются в зависимости от состава вмещающих пород, степени их выветривания и щелочности.

Растворенный уран мигрирует в виде уранил-иона UO_2^{2+}, в котором он находится в своей высшей степени окисления (+6). Восстановленные формы U(+4) практически не растворимы в воде, поэтому по концентрации урана в воде можно делать косвенную оценку окислительно-восстановительных свойств среды. Поверхностные воды Култукского полигона с низкими ($^{234}U/^{238}U$) разделяются на группу с аномально низкими концентрациями урана (менее 0.009 мкг/л, компонент р. Медлянка) и группу с умеренными концентрациями урана (~0.5 мкг/л, компонент р. Култучная). Состав урана первой группы отражает резко восстановительные условия, второй – более окислительные. Возрастание ($^{234}U/^{238}U$) в поверхностных водах с промежуточными концентрациями урана (0.009–0.5 мкг/л) может свидетельствовать о примеси компонента подземных вод (рис. 3). Рис. 4 иллюстрирует соотношения компонентов поверхностных и подземных вод Култукского полигона по составу урана.

На рис. 5 поле фигуративных точек изотопных отношений U и Sr в водах Култукского полигона ограничивается кривыми линиями, сходящимися между собой в точках, соответствующих конечным компонентам E и NE. В первом уран находится в изотопном равновесии (equilibrium U, $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0.7205, ($^{234}U/^{238}U$)=1.0), во втором – имеет сильно неравновесный состав (nonequilibrium U, $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0.70534, ($^{234}U/^{238}U$)=3.3). Область этих точек характеризует воды из пород южной шовной зоны Сибирского кратона. Смещение фигуративных точек вод ст. 26 и 1310 правее этой области (т.е. с относительным обогащением радиогенным Sr) обусловлено латеральной сменой пород шовной зоны архейскими породами Шарыжалгайского блока Сибирского кратона (рис. 6). Изотопная систематика урана и стронция сегмента сильнонеравновесного U дополняется систематикой урана в координатах ($^{234}U/^{238}U$) – 1/U (рис. 7). Состав урана в водах ст. 40 отражает сочетание процессов, протекающих на ст. 27, в центре деформационной системы, и на ее периферии, на ст. 38. Приблизительно равные содержания U на всех трех станциях могут отражать близкую степень окисленности среды.

По данным Иркутской сейсмической станции [*Map…, 2013*], в течение начального периода исследований вод в районе Южно-Байкальской впадины признак активизации проявился 08.01.2013 г. в землетрясении класса 11.2 с эпицентром рядом с пос. Листвянка (51.85° с.ш., 105°16 в.д.), на удалении от пос. Култук на ~100 км к востоку вдоль Обручевского разлома. Затем, 24.04.2013 г., произошло землетрясение класса 10 в районе пос. Култук. Новая сейсмическая активизация имела место 07.06.2013 г. (рис. 8). За все время наблюдений на ст. 9 выделилось 9 максимумов и 10 минимумов ($^{234}U/^{238}U$), составляющих 9 полных циклов (табл. 2). Амплитуды циклов на этой станции превышают ошибку измерений в 2–4 раза. На рис. 9 приводится график временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 9 без обозначения ошибок в сопоставлении с подобными графиками для ст. 11 и 8.

На рис. 10 приводятся графики временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 40 и 27. Временной интервал наблюдений на первой станции (диаграмма *a*) разделяется на три отрезка: 1) 12.04.–04.07.2013 г., 2) 04.07–21.10.2013 г. и 3) 21.10.2013–17.01.2014 г. Начальный и конечный отрезки сходны между собой по резкому снижению кривой с четко выраженной ступенью ($^{234}U/^{238}U$) в средней части, минимумом и последующим поднятием кривой. Временной интервал между сопоставимыми частями этих отрезков составлял 5–6 месяцев. Промежуточный отрезок обозначил крутой рост средних значений ($^{234}U/^{238}U$) в диапазоне 2.34–2.47 ед. активности со средней скоростью около 0.2 ед./год. На ст. 27 также выделяется отрезок нисходящей кривой со ступенью, минимумом и восходящей кривой, частично совпадающий по времени с начальным отрезком ст. 40. Землетрясения Култукского полигона пришлись на согласующиеся во времени ступенчатые части кривых этих станций. По сходной конфигурации линии конечного отрезка наблюдений ст. 40 можно было бы предположить, что образование ступени на нисходящей кривой должно было также сопровождаться землетрясениями. Однако землетрясений не произошло. В связи с этим мы обращаем внимание на отсутствие одновременного проявления ступенчатой конфигурации на ст. 27. По-видимому, для реализации сейсмического события косейсмическая ступень должна быть выражена на обеих станциях.

Сейсмические процессы контролируются триггерами, обеспечивающими эффект синхронизации. Причиной его проявления могут быть процессы самоорганизации. Интервалы синхронизации колебаний, подобно

форшоковой активизации, являются признаками неустойчивого состояния сейсмоактивной области [*Sobolev et al., 2005*]. Подобную информацию о переходе в предсейсмогенное состояние можно получить из анализа вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах из активных разломов. В начальный интервал наблюдений деформационная система Култукского полигона (станции 8, 9 и 11) развивалась медленно, с периодичностью 110–170 дней/цикл. Первые признаки предсейсмогенного состояния на полигоне обозначились совмещением минимумов в циклах всех станций 16.03.2013 г. После общего совмещения минимумов через 39 дней произошло первое сейсмическое событие (24.04.2013 г.). В предсейсмогенном состоянии стали проявляться сравнительно короткие периоды циклов. Второе сейсмическое событие (07.06.2013 г.) отразилось в совмещении минимумов короткопериодных циклов станций 8, 9 и 40 (рис. 11). Время наблюдений на Култукском полигоне разделяется на два интервала, начинающихся: 1) 10.07.2012 г. и 2) 07.08.2013 г. Первый рассматривается в связи с подготовкой и проявлением на полигоне сейсмических событий 10-го класса, второй – в связи с дальнейшей эволюцией деформационной системы, которая может перейти в новое сейсмогенное состояние. Интервал 10.07.2012–07.08.2013 включает три временных отрезка, начинающихся: 1) 10.07.2012 г., 2) 10.01.2013 г. и 3) 12.04.2013 г. (рис. 12). Усиление деформаций вдоль линии 8–9 сопровождалось их проявлением вдоль линии ст. 40 и 27 (субмеридиональное направление 14°), что выразилось в синхронизации ($^{234}U/^{238}U$) этих станций (рис. 13). На фоне хаотического состояния системы наблюдений Култукского полигона выделяются фазы *а–г* последовательной самоорганизации, выраженной в азимутальной синхронизации станций. Пространственный ход зарегистрированных процессов представлял собой последовательность сейсмогенной активизации западного окончания Обручевского разлома (рис. 14).

Из общего анализа временных вариации концентраций U (рис. 15) следует вывод о разной динамике поступления урана в воды ст. 9 и 8. Несовпадающие между собой (фоновые) экстремальные значения ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U в начальный период наблюдений на ст. 9 сменились эпизодами повышенной мобильности урана из деформационной зоны, чередовавшимися с эпизодами повышенной мобильности урана из зоны окисления. На ст. 8 в период с 26.10.2012 г. до 04.07.2013 г. эпизодически проявлялись деформационные урановые импульсы, в том числе сочетавшиеся с землетрясениями 9–10-го класса. Начиная с 07.08.2013 г. эти импульсы сменились урановыми импульсами зоны окисления. На этом этапе произошел аномальный выброс урана.

Заключение. Для обоснования системы наблюдений станций на Култукском сейсмопрогностическом полигоне изучены пространственные вариации ($^{234}U/^{238}U$) в поверхностных и подземных водах. Выявлено преобладание на тектонически стабильных участках компонентов поверхностного стока с частичным примешиванием компонентов грунтовых вод из приповерхностных источников. На участках активных разломов к компонентам поверхностного стока примешиваются компоненты подземных вод из деформационной зоны и зоны окисления. На участках активных разломов без постоянных водотоков в подземных водах обнаружено частичное примешивание к компонентам деформационной зоны компонентов близповерхностных грунтовых вод. Обоснована Sr–U-изотопная систематика подземных вод полигона, и выбраны станции с высокими ($^{234}U/^{238}U$) (2.0–3.3 ед. активности) и низкими $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.705341–0.712927) для мониторинга, продолжавшегося с 27 июня 2012 г. до 28 января 2014 г. Определен колебательный характер временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) с менявшимися во времени амплитудами и длительностями циклов и обнаружена синхронизация циклов ($^{234}U/^{238}U$) в водах линий станций в субширотном и субмеридиональном направлениях во временные интервалы сейсмических толчков на полигоне. В период наблюдений зарегистрирован основной сценарий вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах, обусловленный сейсмогенной активизацией западного окончания Обручевского разлома, который может использоваться для прогноза будущих землетрясений в Южно-Байкальской впадине. Юго-юго-восточное окончание Главного Саянского разлома в настоящее время не активно.

Ключевые слова: Байкал, активный разлом, сейсмический прогноз, подземные воды, $^{234}U/^{238}U$, $^{87}Sr/^{86}Sr$

25 мая 2015 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Сергея Борисовича Брандта (1915–2010), стоявшего у истоков изотопной геологии и посвятившего всю свою жизнь служению науке. Мы посвящаем нашу статью об изотопах урана и стронция в подземных водах светлой памяти Сергея Борисовича.

1. Введение

Для отслеживания текущих деформаций в зонах активных разломов перспективны определения ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах (скобки обозначают единицы активности). Циклическое равновесие отношения активностей $^{234}U/^{238}U \approx (^{234}U/^{238}U) \approx \gamma \approx 1$ соответствует атомному отношению $\approx 5.47 \times 10^{-5}$. Вариации этого параметра могут быть обусловлены эффектом Чалова–Чердынцева – обогащением подземных вод нуклидом ^{234}U в результате деформаций пород [*Cherdyntsev, 1969, 1973; Chalov, 1975; Chalov et al., 1990; Faure, 1989*]. Вариации ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах, связанные с сейсмическими событиями, отмечались неоднократно. В конце 1970-х годов проводились систематические измерения

изотопов и концентраций урана в термальных водах из разломов Южной Калифорнии [*Finkel, 1981*]. Мониторинг в 24 скважинах и источниках проводился с апреля 1978 г. до июля 1980 г. Пробы объемом до 20 л с добавлением спайка ^{232}U и последующей лабораторной обработкой отбирались через один–два месяца. Измерения отношения активностей изотопов урана проводились методом альфа-счета. Концентрации урана в пробах варьировались от 0.002 до 8.3 мкг/л, ($^{234}U/^{238}U$) – от 0.88 до 5.4. В районе исследований 15 октября 1979 г. произошло крупное землетрясение Imperial Valley с магнитудой 6.6. После землетрясения, во второй половине октября и в ноябре, концентрации урана в воде возросли более чем в 60 раз и ($^{234}U/^{238}U$) снизились в три раза (почти до равновесного отношения) на расстоянии 70 км от эпицентра, на участке Niland Slab. Относительное возрастание ($^{234}U/^{238}U$) от 2.6 до 5.4 наблюдалось на этом участке перед землетрясением в течение года. В 1973–1975 гг. проводились систематические мониторинговые измерения ($^{234}U/^{238}U$) в водах из активных разломов Северо-Тянь-Шаньской сейсмической зоны методом альфа-счета в комплексе определений изотопных параметров (^{222}Rn, ^{4}He и др.). Отсутствие крупных землетрясений в период наблюдений не дало возможности выделить какие-либо сейсмопрогностические признаки [*Chalov et al., 1980*].

В 1970–1980-х гг. использовались трудоемкие методы измерения изотопных отношений урана. Для регистрации ($^{234}U/^{238}U$) уран концентрировался из больших объемов вод (до 300 л) в полевых условиях на активированном угле с последующим выделением урана в лаборатории и измерением изотопных отношений альфа-счетом. В настоящее время для измерений концентраций и изотопных отношений урана разрабатываются экспрессные методики с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС) [*Halicz et al., 2000; Shen et al., 2002; Cizdziel et al., 2005; Chebykin et al., 2007*]. Этим методом могут анализироваться серии проб, поэтому проблема сейсмопрогностического значения урановой изотопной систематики подземных вод в свете режимных наблюдений может быть выведена на качественно новый уровень.

В Байкальской рифтовой зоне сильные землетрясения происходили в историческом прошлом и случаются в наши дни [*Sherman et al., 1984; Solonenko et al., 1985; Map..., 2013*]. В Южно-Байкальской впадине имели место крупные сейсмические события в 1999 и 2008 гг. (соответственно, M_W=6.8 и 6.3). Условиям их проявления были посвящены специальные исследования [*Radziminovich et al., 2006; Melnikova et al., 2012; Timofeev et al., 2013; и др.*]. Эпицентр главного толчка последнего из них (названного Култукским) находился в акватории Байкала, в 40 км к востоку-юго-востоку от пос. Култук, расположенного на западной оконечности озера. Афтершоки смещались к этому поселку. В этом же направлении происходило вспарывание разрывов. Существует вероятность проявления нового крупного сейсмического события в районе пос. Култук, территория которого рассматривалась как область потенциального очага землетрясения [*Sankov et al., 2004; Dobrynina, Sankov, 2008*]. Для предупреждения возможной сейсмогенной катастрофы здесь разрабатывается система наблюдений текущих деформаций в земной коре.

Настоящая работа по измерениям ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах преследует цель – выбрать на Култукском полигоне наиболее чувствительные станции для наблюдений активности крупных разломов – субширотного Обручевского и запад-северо-западного Главного Саянского, ограничивающих с юга Шарыжалгайский выступ кристаллического фундамента Сибирского кратона (рис. 1).

Область афтершоков Култукского землетрясения ограничивалась с севера Обручевским разломом (рис. 1). Кайнозойская амплитуда сброса по этому разлому с опусканием фундамента Южно-Байкальской впадины относительно ее северного борта составляет до 6 км [*Logatchev, Zorin, 1992; Suvorov, Mishenkina, 2005*]. В районе пос. Култук амплитуда вертикальных смещений в западном направлении быстро уменьшается. Во временном интервале 18–12 млн лет назад здесь происходили извержения Култукского вулкана – одной из построек Камарской вулканической зоны, простиравшейся в юго-западном направлении на 20 км [*Rasskazov et al., 2013b*].

Главный Саянский разлом находится на траверсе эпицентра главного сейсмического толчка и осевой части треугольника афтершоков Култукского землетрясения. В новейшей структуре разлом выражен слабо. В его зоне обнаружены сейсмодислокации с левосторонним смещением, которые рассматривались как признак современной сдвиговой активности разлома [*Chipizubov, Smekalin, 1999*]. Структурных признаков его активизации во время Култукского землетрясения 2008 г., однако, не отмечалось.

В районе Култукского полигона землетрясения происходят редко, поэтому есть возможность получить данные о фоновых вариациях сейсмопрогностических параметров этой территории. Первые результаты измерений ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах из зон активных разломов Байкальского региона и сопредельных территорий приведены нами в коротких сообщениях [*Chebykin et al., 2013, 2015; Rasskazov et al., 2013a*]. Для выявления характера проявления эффекта Чалова–Чердынцева и в целях

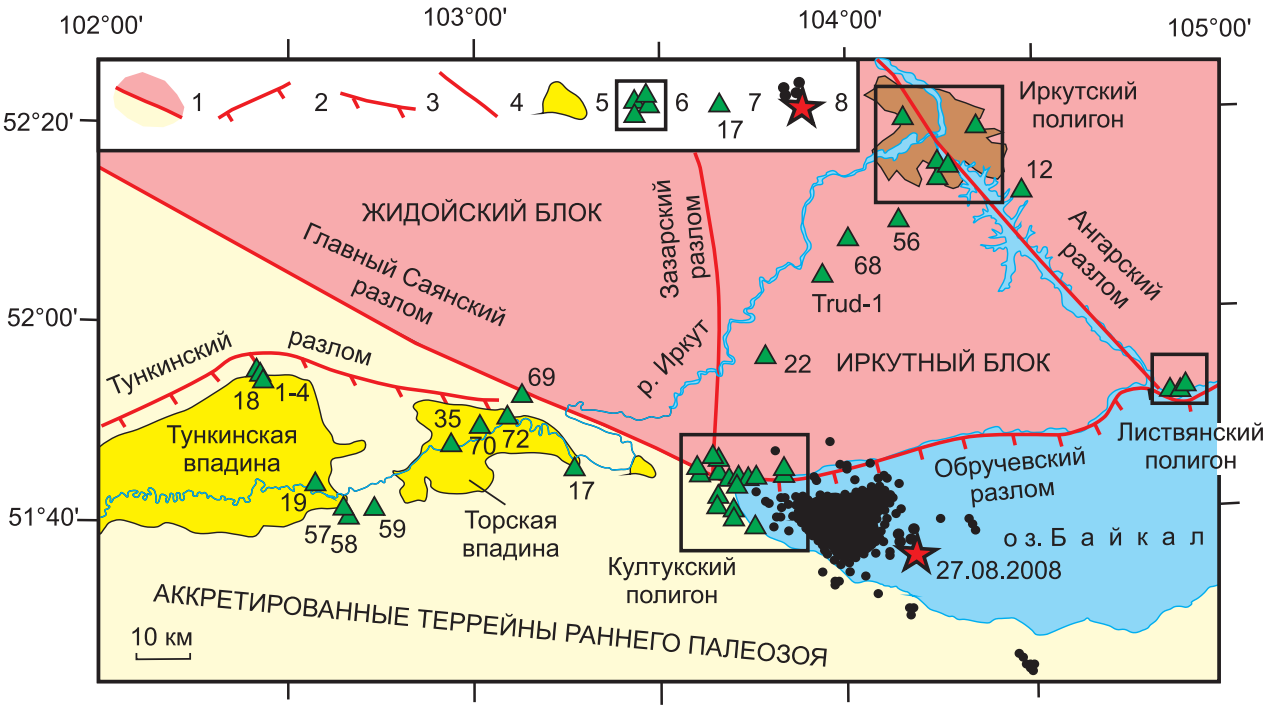


Рис. 1. Схема местоположения Култукского, Иркутского и Листвянского сейсмопрогностических полигонов и отдельных станций опробования родниковых, минеральных и речных вод в зонах крупных активных разломов Южно-Байкальской впадины и Тункинской рифтовой долины.

1 – юго-западная шовная зона Сибирского кратона; *2–4* – другие крупные разломы, проявляющие современную активность: сбросо-сдвиг (*2*), сброс (*3*), неясного кинематического типа (*4*) (местоположение Зазарского разлома, разделяющего Иркутный и Жидойский блоки Шарыжалгайского выступа кристаллического фундамента Сибирского кратона, показано по работе [*Melnikov, 2011*]); *5* – впадина; *6* – полигон опробования; *7* – отдельная станция опробования; *8* – эпицентр главного сейсмического толчка (красная звездочка) и распределение афтершоков сосредоточенной компоненты (черные кружки) Култукского землетрясения [*Melnikova et al., 2012*].

Fig. 1. The schematic map showing locations of the Kultuk, Irkut and Listvyanka seismic prediction polygons and stations whereat spring, mineral and river water samples were taken from zones of large active faults in the Southern Baikal basin and the Tunka rift basin.

1 – SW suture zone of the Siberian craton; *2–4* – other recently active large faults: shear fault with normal-fault component (*2*), normal fault (*3*), fault of unclear kinematic type (*4*) (the location of the Zazar fault separating the Irkut and Zhidoi blocks of the Sharyzhalgai block of the crystalline basement of the Siberian craton is shown according to [*Melnikov, 2011*]); *5* – basin; *6* – sampling polygon; *7* – sampling station; *8* – epicentre of the main seismic shock (red star) and scattered aftershocks of the localized component (black circles) of the Kultuk earthquake [*Melnikova et al., 2012*].

разработки подходов к сейсмическому прогнозу с использованием вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах в настоящей работе обосновывается эффективность сейсмопрогностической системы наблюдений. Сначала проводится сравнительный анализ вариаций ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U в поверхностных и подземных водах полигона, затем дается систематика подземных вод по соотношениям ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$, и, наконец, исследуется характер пространственно-временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) и азимутального согласования временных изменений этого параметра на станциях полигона с сильно неравновесным ураном в сопоставлении с сейсмическими событиями, произошедшими на полигоне за временной интервал наблюдений. Использованы данные, полученные для 170 проб из сорока серий, отобранных в период с 27 июня 2012 г. до 28 января 2014 г.

2. Методика

Опробование поверхностных вод Култукского полигона проводили из речек и ручьев, а подземных вод – из родников, глубоких (80–120 м) и неглубоких (7–30 м) скважин. Для выявления долгопериодных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах из активных разломов станции опробования посещали с частотой от 1 до 3 недель. Для аналитических исследований проб большинства станций было

достаточно 0.5 л воды. В случае малых концентраций U и других химических элементов в воде станции объем пробы увеличивали до 3 л. Пробы отбирали в бутылки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) из-под глубинной байкальской воды. Фабрично запечатанную бутылку с байкальской водой вскрывали непосредственно перед отбором пробы, опорожняли и тщательно ополаскивали отбираемой пробой. Для опробования одной и той же станции допускалось повторное использование бутыли с предварительной промывкой новой пробой воды. При необходимости краткосрочного хранения (до 3 месяцев) отобранные пробы пропускали через мембранные фильтры (0.45 мкм), фиксировали азотной кислотой (ОСЧ), дважды перегнанной с помощью системы суббойлинговой перегонки Savillex DST–1000. Пробы хранили в холодильнике.

В водах разных станций Култукского полигона получили интервалы концентраций U от 0.0087 до 5.2 мкг/л и величин ($^{234}U/^{238}U$) – от 1.09 до 3.29. Типичная относительная ошибка определения изотопных отношений составляла около 1 % (1 σ). Аналитические исследования проводили методом ИСП–МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск).

Для определения изотопного состава урана в природных водах использовали разработанную методику выделения и обогащения урана на ионообменной смоле TRU Resin–B (50–100μm, Triskem Int., Франция). Образцы воды фильтровали (0.45 мкм), подкисляли азотной кислотой (3 %) и загружали в ионообменные полипропиленовые колонки, содержащие 0.5 мл смолы TRU. Уран элюировали 1.5 мл 0.1 М оксалата аммония $(NH_4)C_2O_4$. Элюаты разбавляли в два раза 3%-ной HNO_3 и анализировали согласно подходам, разработанным ранее [*Chebykin et al., 2007*]. Для контроля качества измерений применяли стандартный образец изотопного состава природного урана ГСО 7521-99 (Уральский электрохимический комбинат, г. Новоуральск).

Для измерения $^{87}Sr/^{86}Sr$ выделяли стронций из пробы воды по упрощенной методике [*Pin, Bassin, 1992*]. Пробу отфильтрованной и подкисленной азотной кислотой воды объемом от 10 до 50 мл (в зависимости от концентрации Sr) выпаривали, затем добавляли по 1 мл 2 М HNO_3 и выпаривали досуха. После добавления 2 мл 2 М HNO_3 пропускали подготовленный раствор через ионообменные колонки, заполненные 83 мг смолы Sr Resin–B (50–100μm, Triskem Int., Франция). Для удаления из смолы Ba, Rb и других сопутствующих элементов колонки промывались 3 мл 7 М HNO_3. После добавления 0.5 мл 3 М HNO_3 стронций элюировали из смолы слабым раствором азотной кислоты (0.05 М HNO_3). Подготовленную фракцию стронция измеряли на масс-спектрометре Finnigan MAT 262 Байкальского аналитического центра коллективного пользования (масс-спектрометрические измерения Н.Н. Фефелова). Для контроля качества измерений применяли стандартный образец NBS 987. В период измерений стронциевых изотопных отношений в пробах получили значение стандартного образца 0.710248±0.000013, сопоставимое с принятым значением 0.71025 [*Faure, 2001*].

3. Результаты

Култукский полигон охватывает сравнительно крупные бассейны речек Култучная, Ангасолка, Слюдянка, Похабиха и Талая, а также небольшие бассейны ручьев Медлянка и Воротный. Базису эрозии в этих бассейнах соответствует зеркало оз. Байкал. В бассейнах выделяются участки опробования: Старая Ангасолка, Слюдянка, Воротный, Медлянка, в бассейне р. Култучная – два участка, Тигунчиха и Вербный. Еще два участка, Школьный и Земляничный, находятся на склонах, лишенных постоянных водотоков (рис. 2).

Участки Старая Ангасолка северо-восточной части полигона и Слюдянка его юго-западной части характеризуют гидрохимическую обстановку, соответственно, на кристаллическом фундаменте Сибирского кратона и на Слюдянском метаморфическом субтеррейне Хамардабанского составного террейна [*Belichenko et al., 2006*].

Участки Тигунчиха и Воротный находятся на трассах палеосейсмодислокаций зоны Главного Саянского разлома, в левобережной части бассейна р. Култучная, а участок Вербный – южнее этих трасс, в правобережной части речного бассейна. Последний участок расположен на крутом северном фасе хр. Камар, слабо расчлененном короткими ручьями протяженностью несколько километров.

Участок Медлянка приходится на северо-западное окончание озерной впадины и западное окончание уступа Обручевского разлома. В поверхностном стоке бассейна выделяются водотоки двух речек под общим названием Медлянка. Одна из них (Медлянка–1) впадает в оз. Байкал, не имеет боковых притоков и представляет собой короткое (около 1 км) русло, заложенное в основании крутого уступа со 100-метровым смещением по Обручевскому сбросу базальтовых слоев Култукского вулкана [*Rasskazov et al., 2013b*]. Другая (Медлянка–2) имеет разветвленную систему притоков в северо-западной части пос. Култук, в районе железнодорожного туннеля Партизанский. Рассредоточенные водотоки р. Медлянка–2 находятся в зоне одного

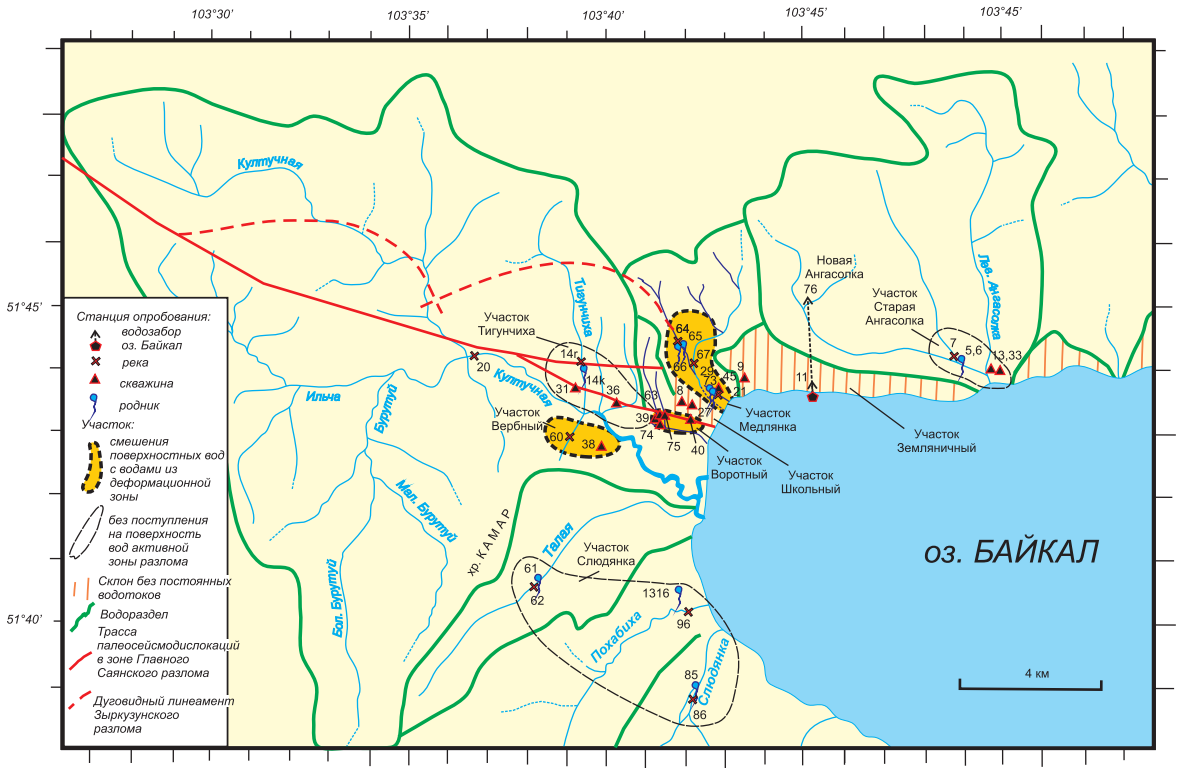


Рис. 2. Схема расположения участков опробования Култукского полигона относительно водосборных бассейнов (объяснения в тексте).

Для участков Школьный и Земляничный показаны только основные станции. Водораздельные линии ограничивают бассейны рек с современным базисом эрозии на зеркале оз. Байкал. Дуговидные структуры Зыркузунского разлома нанесены по работе [*Lamakin, 1968*], трассы палеосейсмодислокаций Главного Саянского разлома – по работе [*Chipizubov, Smekalin, 1999*].

Fig. 2. The schematic map showing sampling sites in the Kultuk polygon in relation to catchment basins (explanations are given in the text).

Only main stations are shown on Shkolny and Zemlyanichny sites. Watershed lines mark the river valleys with the current base level of erosion at the level of the Lake Baikal surface. Arc-shaped structures of the Zyrkuzun fault are shown after [*Lamakin*, *1968*]. Paleoseismodislocations of the Main Sayan fault are shown after [*Chipizubov, Smekalin*, *1999*].

из двух дугообразных линеаментов Зыркузунского разлома, простирающихся от северо-западной окраины пос. Култук почти до Зыркузунской петли р. Иркут [*Lamakin, 1968*].

Результаты измерений концентраций U и ($^{234}U/^{238}U$) в водах участков Култукского полигона приведены в табл. 1. В водах участков Тигунчиха, Слюдянка и Старая Ангасолка ($^{234}U/^{238}U$) не превышает 1.51 ед. активности. В водах участков Вербный, Воротный, Медлянка, Школьный и Земляничный наблюдается относительное обогащение ^{234}U с увеличением ($^{234}U/^{238}U$) до 3.29. Максимальная концентрация U (5.2 мкг/л) определена в воде из скважины участка Тигунчиха, минимальная (0.0087 мкг/л) – в воде из речки Медлянка–2.

3.1. Участок Старая Ангасолка

Из р. Ангасолка, на ст. 7 (рис. 2), пробы воды отбирались шесть раз с периодичностью 2–3 недели в течение четырех месяцев лета и осени, с 28.06.2012 г. до 26.10.2012 г. Содержание U менялось от 1.7 до 2.6 мкг/л. С относительным повышением концентраций U значения ($^{234}U/^{238}U$) снижались. Максимальной концентрации соответствовало минимальное ($^{234}U/^{238}U$)=1.31±0.03 (здесь и далее ошибка 1σ), а минимальной концентрации – максимальное ($^{234}U/^{238}U$)=1.45±0.02.

В родниках ст. 5 и 6 выполнялось параллельное опробование со станцией 7 и последующее опробование до 01.06.2013 г. Всего взято 12 проб. Измеренные концентрации U в них составляли от 0.12 до 0.25 мкг/л при вариациях ($^{234}U/^{238}U$) от 1.44 до 1.51.

Выше устья р. Ангасолка, в Старой Ангасолке, отбирались пробы воды из двух неглубоких скважин (ст. 13 и 33). Одна пройдена в 10-метровой цокольной террасе, вторая – в аллювии речки. Значения ($^{234}U/^{238}U$) составили 1.42±0.02 и 1.39±0.01 при концентрациях U, соответственно, 0.28 и 0.032 мкг/л.

Таблица 1. **Результаты измерений концентраций U и ($^{234}U/^{238}U$) в подземных и поверхностных водах Култукского полигона**

Table 1. **Measured concentration of U and ($^{234}U/^{238}U$) ratios in groundwater and surface water samples from the Kultuk polygon**

Ст.	Дата	Время	Серия	Объект	Широта	Долгота	U, мкг/л	($^{234}U/^{238}U$)	Отн. ошибка, % (1 σ)
Участок Старая Ангасолка									
5	04.02.2013	12:30	11	Родник	51°44.210’	103°48.794’	0.12	1.51	1.1
6	28.06.2012	17:00	6	Родник	51°44.210’	103°48.794’	0.25	1.48	1.1
13	16.09.2012	13:00	4	Скважина	51°43.948’	103°49.720’	0.27	1.42	1.1
33	15.03.2013	19:00	13	Скважина	51°43.947’	103°49.718’	0.28	1.39	0.89
7	06.10.2012	12:25	5	Речка	51°44.216’	103°48.759’	0.032	1.45	1.7
Участок Слюдянка									
61	09.07.2013	14:20	25	Родник	51°40.573’	103°38.364’	0.37	1.27	1.2
62	09.07.2013	14:40	25	Речка	51°40.457’	103°38.213’	0.42	1.23	1.2
85	27.02.2014	16:45	41	Родник	51°39.050’	103°42.300’	0.35	1.35	0.89
Участок Тигунчиха									
14k	27.01.2013	11:20	11	Родник	51°44.001’	103°39.500’	0.9	1.14	0.86
31	12.04.2013	17:20	16	Скважина	51°43.650’	103°39.387’	5.2	1.18	0.86
36	29.03.2013	16:10	15	Скважина	51°43.227’	103°39.956’	0.17	1.26	1.2
14r	06.09.2012	17:00	4	Речка	51°44.001’	103°39.499’	0.041	1.38	1.8
Участок Воротный									
40	09.09.2013	20:55	30	Скважина	51°43.300’	103°42.291’	0.21	**2.47**	0.76
63	09.07.2013	13:30	25	Скважина	51°43.371’	103°41.075’	3.1	1.30	0.84
39	29.03.2013	15:24	15	Скважина	51°43.222’	103°40.487’	0.3	1.22	0.91
74	28.01.2014	10:25	40	Колодец	51°43.304’	103°40.986’	0.37	1.34	0.94
75	28.01.2014	10:55	40	Скважина	51°43.364’	103°41.173’	3.5	1.45	0.84
Участок Вербный									
38	09.09.2013	20:30	30	Скважина	51°43.170’	103°39.700’	0.26	**2.03**	0.89
60	09.07.2013	10:45	25	Ручей	51°43.185’	103°39.238’	0.47	1.56	1.1
20	11.11.2012	18:00	25	Речка	51°44.402’	103°36.659’	0.53	1.31	0.92
Участок Медлянка									
29	04.02.2013	14:38	11	Родник	51°43.803’	103°42.553’	0.046	**2.09**	1.1
73	07.12.2013	14:15	37	Родник	51°43.768’	103°42.629’	0.072	**2.11**	1.1
45	12.04.2013	13:30	16	Скважина	51°43.794’	103°43.061’	3.8	1.12	0.93
21	11.11.2012	18:25	7	Медлянка–1	51°43.656’	102°42.875’	0.045	1.90	1.5
66A	07.12.2013	13:08	37	Колодец	51°44.342’	103°41.778’	0.12	**2.66**	0.9
66	09.07.2013	15:15	25	Родник	51°44.205’	103°41.501’	0.035	**2.45**	2.0
65	09.07.2013	15:10	25	Штольня–13	51°44.262’	103°41.496’	0.24	1.67	1.1
67	09.07.2013	15:30	25	Медлянка–2	51°44.159’	103°42.117’	0.022	1.57	2.9
64	09.07.2013	15:05	25	Медлянка–2	51°44.262’	103°41.496’	0.0087	1.26	4.3
Участок Школьный (без постоянных водотоков)									
27	02.10.2013	13:22	32	Скважина	51°43.521’	103°42.384’	0.27	**3.29**	0.69
8	10.01.2013	15:28	10	Скважина	51°43.570’	103°41.931’	3.1	**2.38**	0.70
8A	21.01.2014	20:00	40	Скважина	51°43.571’	103°41.932’	0.48	**2.24**	0.72
43	12.04.2013	16:34	16	Скважина	51°43.366’	103°42.106’	0.26	**1.98**	0.72
30	09.07.2013	14:40	25	Колодец	51°43.835’	103°42.370’	0.013	1.74	3.0
44	12.04.2013	17:00	16	Скважина	51°43.752’	103°42.418’	0.54	1.68	0.78
41	12.04.2013	16:00	16	Скважина	51°43.432’	103°42.899’	0.018	1.50	2.1
15	10.01.2013	14:30	10	Скважина	51°43.629’	103°42.455’	0.038	1.44	1.5
Участок Земляничный (без постоянных водотоков)									
9	09.07.2013	16:00	25	Скважина	51°43.795’	103°43.294’	0.16	**2.56**	0.56
1310	07.08.2013	9:37	28	Родник	51°43.795’	103°43.689’	0.70	**2.22**	0.88
26	08.09.2013	10:00	30	Скважина	51°43.826’	103°43.633’	0.41	1.88	0.81
11	04.02.2013	13:17	11	Водозабор оз. Байкал	51°43.729’	103°45.460’	0.48	2.01	0.64
76	28.01.2014	15:15	40	Водозабор оз. Байкал	51°44.915’	103°45.223’	0.48	1.94	0.46

Примечание. При неоднократном измерении проб станции (ст.) приводится результат, полученный для пробы из серии с максимальным ($^{234}U/^{238}U$). Жирным шрифтом выделены высокие значения ($^{234}U/^{238}U$), характеризующие преобладание компонента из деформационной зоны.

Note. Results for a sample from a set with a maximum ($^{234}U/^{238}U$) ratio are shown in case of multiple sampling at the given station. Bold printed are high ($^{234}U/^{238}U$) ratios that characterize the dominating component in the deformation zone.

3.2. Участок Слюдянка

Единичная проба воды из р. Талая, отобранная на сейсмостанции с одноименным названием, показала сравнительно низкое ($^{234}U/^{238}U$) (1.23±0.02) при концентрации U=0.42 мкг/л. Близкое изотопное отношение при близкой концентрации урана (соответственно, 1.27±0.02 и 0.37 мкг/л) получено для пробы воды из выхода родника у ворот сейсмостанции. Ориентировочные данные для поверхностных и подземных вод этого участка свидетельствуют о более низком ($^{234}U/^{238}U$), по сравнению с водами участка Ангасолка.

3.3. Участок Тигунчиха

В речке Тигунчиха, на ст. 14r (рис. 2), пробы воды отбирались четыре раза с периодичностью 3–4 недели в течение двух осенних месяцев, с 06.09.2012 г. до 14.11.2012 г. Измерение первой пробы дало значение ($^{234}U/^{238}U$)=1.38±0.02 при содержании U=0.041. Для трех последующих проб получено значение ($^{234}U/^{238}U$)=1.34±0.02 при повышенных содержаниях U в интервале от 0.069 до 0.079 мкг/л.

Родник в левом борту долины р. Тигунчиха (ст. 14k) опробовался начиная с 06.09.2012 г., со средней периодичностью около двух-трех недель. Получен интервал ($^{234}U/^{238}U$) от 1.09 до 1.14 при концентрациях U=0.42–0.96 мкг/л.

На участке опробовано три скважины. Одна из них (ст. 31) – сравнительно глубокая (около 80 м), две другие – пройдены на глубину 7 и 15 м. Значения ($^{234}U/^{238}U$), измеренные в водах ст. 31 (1.17–1.18), приближаются к значениям в родниковой воде ст. 14k, но отличаются от них резким повышением концентраций U (4.2–5.2 мкг/л). В водах из малоглубинных скважин определен интервал ($^{234}U/^{238}U$)=1.22–1.30 и концентраций U=0.17–3.1 мкг/л. Отношения изотопов урана приближаются к отношениям в воде речки Тигунчиха.

По значениям параметра ($^{234}U/^{238}U$) поверхностные воды участка имеют контрастные соотношения с водами родника и глубокой скважины и менее контрастные – с водами из малоглубинных скважин.

3.4. Участок Воротный

Скважина глубиной около 100 м (ст. 40) пройдена на стрелке федеральной шоссейной дороги М-55 и ответвления дороги в п. Монды. Здесь проходит трасса палеосейсмодислокаций зоны Главного Саянского разлома. На ней постоянно проводился мониторинг с периодичностью около двух недель, начиная с 12.04.2013 г. Получены высокие ($^{234}U/^{238}U$) – в интервале от 2.34 до 2.47 при относительной ошибке измерений 0.52–0.98 % и концентрации U от 0.18 до 0.22 мкг/л. В поверхностных водах участка состав урана не определялся.

В западной части участка опробовались также две неглубокие скважины и один колодец (ст. 63, 75 и 74). Низкие изотопные отношения урана в пробах сопоставимы с отношениями в водах из скважин участка Тигунчиха.

3.5. Участок Вербный

В отличие от участка Воротный, участок Вербный относится к бассейну р. Култучная, в воде которой (ст. 20) ($^{234}U/^{238}U$)=1.31±0.01 при содержании U=0.53 мкг/л. В правом притоке р. Култучная (ст. 60) значение ($^{234}U/^{238}U$) возрастает до 1.56±0.02 при снижении содержания U до 0.47 мкг/л. В скважине остановочного пункта Вербный (ст. 38) ($^{234}U/^{238}U$) еще выше (1.97–2.04) при более низких концентрациях U (0.25–0.28 мкг/л). Данные по водам из скважины получены по пяти измерениям, выполненным в период с 29.03.2013 г. до 07.12.2013 г. В воде ручья, стекающего с северного фаса Камарского хребта (ст. 60), наблюдались промежуточные значения уран-урановых отношений и концентраций урана между значениями в речной воде (ст. 20) и скважины (ст. 38). Повышенные ($^{234}U/^{238}U$) в водах участка Вербный связаны с присутствием компонента из активной зоны разлома.

3.6. Участок Медлянка

Компонент из активной зоны разлома выражен в поверхностном стоке р. Медлянка–1. В пробе воды, отобранной недалеко от ее устья (ст. 21), значение ($^{234}U/^{238}U$)=1.90±0.03 при содержании U=0.045 мкг/л. В русле этой речки находятся два родника, расположенные в 100 м один от другого (ст. 29 и 73). В одном из них ($^{234}U/^{238}U$)=2.09±0.02 при содержании U=0.046 мкг/л, в другом – ($^{234}U/^{238}U$)=2.11±0.02 при содержании U=0.072 мкг/л.

Повышенные значения ($^{234}U/^{238}U$) в воде р. Медлянка–1, близкие к таковым в воде обоих источников, свидетельствуют о значительном вкладе подземных вод в ее водный баланс. Основной поток подземных вод сфокусирован в основании уступа Обручевского разлома, зону которого дренирует эта короткая (около 1 км) речка.

Необычный изотопный состав урана определен в воде из 100-метровой скважины, расположенной вблизи федеральной трассы М-55 в нижней части крутого северного борта р. Медлянка–1 (ст. 45), – высокое содержание урана (3.8 мкг/л) с низким ($^{234}U/^{238}U$) (1.12±0.01). В бассейне р. Медлянка–2

доля подземных вод в поверхностном стоке резко снижается. В речке правого распадка бассейна (ст. 64) получено низкое ($^{234}U/^{238}U$) – 1.26±0.05 при самом низком содержании U (0.0087 мкг/л) для всего полигона. В левом распадке бассейна (ст. 67) ($^{234}U/^{238}U$) и концентрации U в воде поверхностного стока возрастают и составляют, соответственно, 1.57±0.05 ед. активности и 0.022 мкг/л.

Вода с компонентом из активной зоны разлома идентифицирована на остановочном пункте (о.п.) Партизанский (ст. 66А и 66). В пробе воды из колодца обнаружено ($^{234}U/^{238}U$)=2.66±0.02 при содержании U=0.12 мкг/л, в пробе из родника – ($^{234}U/^{238}U$)=2.45±0.05 при более низком содержании U (0.035 мкг/л). Промежуточное ($^{234}U/^{238}U$) (1.67±0.02) при повышенной концентрации U (0.24 мкг/л) определено в воде дренирующей штольни Партизанского железнодорожного туннеля (ст. 65).

3.7. Участок Школьный

Участок находится в центральной части полигона, между участками Медлянка и Воротный на блоке, поверхность которого при тектоническом поднятии оказалась наклоненной к оз. Байкал [*Rasskazov et al., 2013b*] (рис. 2). Здесь обнаружено наиболее высокое значение ($^{234}U/^{238}U$) для Култукского полигона – 3.29±0.02 при содержании U=0.27 мкг/л (ст. 27). Скважина этой станции находится рядом со школой № 7. Ее глубина 120 м. В интервале глубин 0–35 м она зацементирована. Дырчатые фильтры диаметром 16 мм установлены в обсадных трубах в интервалах глубин 55–60 и 80–90 м. Скважина пройдена в плотных валунно-глыбовых и песчано-щебнистых отложениях, включающих обломки магматических и метаморфических пород.

Из семи опробованных станций участка в трех значения ($^{234}U/^{238}U$) превышают 2 (ст. 27, 8 и 8А), в одной – отношение близко к 2 (1.98±0.01 для ст. 43). Особенность вод ст. 8 – высокая концентрация U (3.1 мкг/л). На других станциях участка концентрации U находятся в интервале от 0.018 до 0.54 мкг/л. Скважина ст. 8 пройдена на глубину 120 м. В 50 м от нее опробована вода из неглубокой скважины (ст. 8А), в которой ($^{234}U/^{238}U$)=2.24 приближается к значению ст. 8 при низкой концентрации U (0.48 мкг/л). Эти соотношения свидетельствуют о том, что на участке Школьный имеется зона с повышенными значениями ($^{234}U/^{238}U$), которая охватывает разные по глубине уровни залегания подземных вод при варьирующихся концентрациях U.

3.8. Участок Земляничный

Участок находится в зоне Обручевского разлома и характеризуется сравнительно высокими ($^{234}U/^{238}U$) отношениями (1.88–2.56) в подземных водах трех станций при вариациях концентраций урана в диапазоне 0.16–0.70 мкг/л. В водах явно преобладает компонент из активной зоны разлома. Опробовалась также вода оз. Байкал из водозабора на расстоянии от берега 15 м с глубины 8 м, обеспечивающего водоснабжение остановочного пункта на 154-м км Кругобайкальской железной дороги (ст. 11) и железнодорожной станции Новая Ангасолка Восточно-Сибирской магистрали (ст. 76). На первой станции проводились многократные измерения и получено максимальное значение ($^{234}U/^{238}U$) (2.01±0.01) при концентрации U (0.48 мкг/л), на второй станции определено одно значение ($^{234}U/^{238}U$) (1.94±0.01) при той же концентрации U.

4. Анализ результатов и обсуждение

Эффект Чалова–Чердынцева означает процесс отдачи нуклида ^{234}U, обогащающего трещинные воды, омывающие породу. В качестве причины отдачи могут выступать разные факторы: воздействие на породу реакционной среды, развитие дислокаций в урансодержащем минерале–хозяине, выветривание породы и др. [*Cherdyntsev, 1973*]. В активных разломах ($^{234}U/^{238}U$) зависит от текущих деформаций. Чем выше деформации, вызывающие образование трещин, тем выше ($^{234}U/^{238}U$). Изотопный состав Sr существенно зависит от химического выветривания породы. Его первичный состав может сохраниться в центральных частях минералов породы и выявляется посредством предварительной обработки пробы измененной породы раствором соляной кислоты [*Rasskazov et al., 2012*]. В целом изотопные отношения U и Sr в подземных и поверхностных водах меняются в зависимости от состава вмещающих пород, степени их выветривания и щелочности. Для вод территорий с разным геологическим строением и породами предполагается смешение двух и более компонентов разного происхождения [*Riotte, Chabaux, 1999; Paces et al., 2002; Chabaux et al., 2008; и др.*]. Отношения ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ рассматриваются как чувствительные индикаторы взаимодействия вода–порода и могут использоваться для количественных оценок инфильтрационного потока [*Maher et al., 2006*].

4.1. Зависимость распределения U в поверхностных и подземных водах от окисленности пород

Растворенный уран мигрирует в виде уранил-иона UO_2^{2+}, в котором он находится в своей высшей степени окисления (+6). Восстановленные формы U(+4) практически не растворимы в воде, поэтому

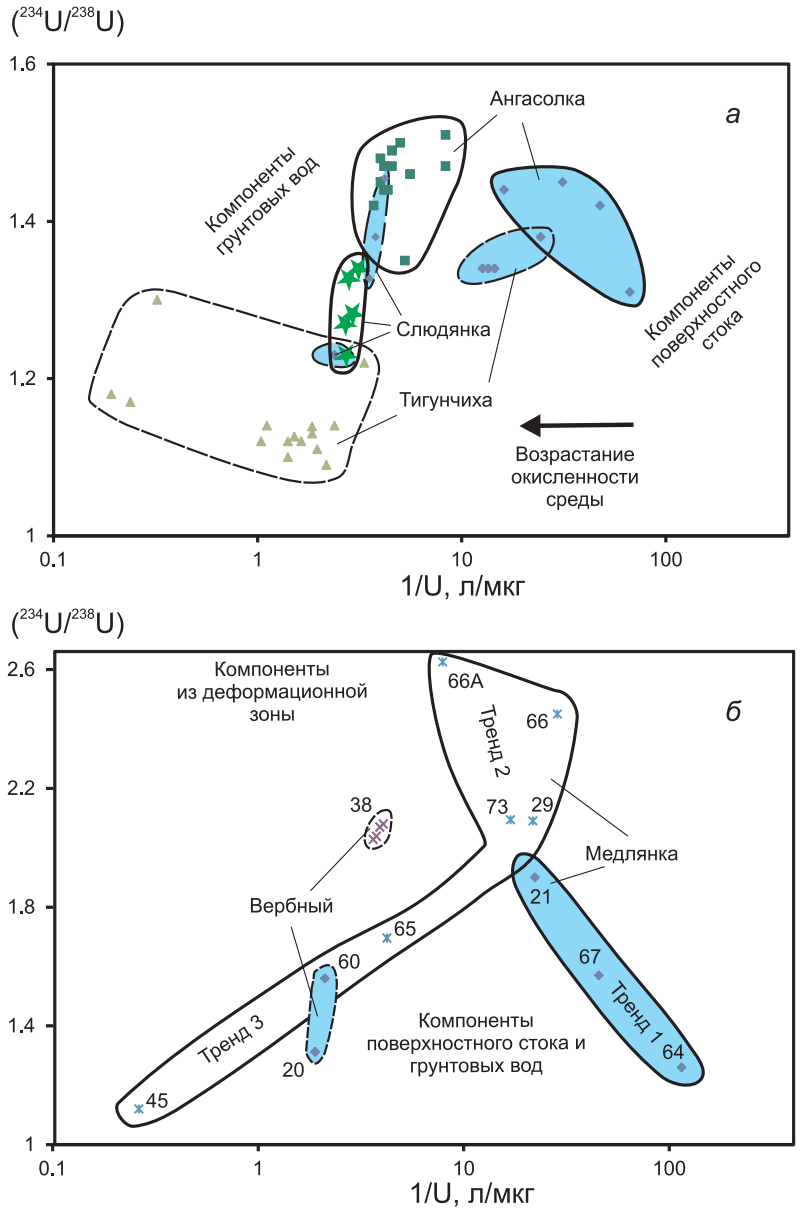


Рис. 3. Соотношения ($^{234}U/^{238}U$) и обратной концентрации урана в водах поверхностного и подземного стока на участках Ангасолка, Слюдянка, Тигунчиха (*а*) и Медлянка, Вербный (*б*) (объяснения в тексте).

На обеих диаграммах голубым фоном выделены поля фигуративных точек вод поверхностного стока. Типичная ошибка измерений (1σ) составляет около 1 отн. % (табл. 1).

Fig. 3. ($^{234}U/^{238}U$) versus 1/U in water of the surface and groundwater runoff on Angasolka, Slyudyanka, Tigunchikha (*a*) and Medlyanka and Verbny (*б*) sites (explanations are given in the text).

In both diagrams, fields of data points of surface water are marked in blue. A typical error (1σ) is about one relative percent (Table 1).

по концентрации урана в воде можно делать косвенную оценку окислительно-восстановительных свойств среды (при взаимодействии порода–вода и в процессе последующего транспорта подземных вод).

На диаграмме рис. 3, *а*, воды р. Ангасолка имеют минимальные концентрации U (максимальное 1/U), воды р. Тигунчиха – промежуточные (промежуточные 1/U), а воды р. Талая – максимальные (минимальное 1/U). Смещение состава урана в поверхностных водах обозначает изменение обстановки от наиболее окислительной в бассейне р. Талая, через промежуточную – в бассейне р. Тигунчиха к менее окислительной – в бассейне р. Ангасолка. С увеличением окисленности в речной воде возрастает содержание равновесного компонента урана относительно неравновесного, т.е. отношения ($^{234}U/^{238}U$) уменьшаются.

Подземные воды участка Ангасолка сопоставимы по ($^{234}U/^{238}U$) с поверхностными водами и отличаются от них повышенными содержаниями U. В подземных водах участка Тигунчиха преобладает компонент равновесного урана, образующийся в окислительных условиях. На участке Слюдянка состав урана в воде родника близок к составу урана в речной воде.

На диаграмме рис. 3, *б*, для участка Медлянка показаны три протяженных тренда. Тренд 1 обозначает смешение компонента поверхностных вод, обедненных U в восстановительных условиях, с компонентом из деформационной зоны, представленным на ст. 73 (в роднике р. Медлянка–1) и ст. 66А (в колодце о.п. Партизанский). Речные воды бассейна р. Медлянка с наиболее низким ($^{234}U/^{238}U$) формировались в более восстановительной среде, чем воды р. Ангасолка. Тренд 2 свидетельствует о возрастании ($^{234}U/^{238}U$) в водах станций о.п. Партизанский (ст. 66 и 66А) относительно родников р. Медлянка–1 (ст. 29 и 73), обусловленном поступлением урана из деформационной зоны. Тренд 3 дает представление о снижении ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 65 и 45 относительно родников р. Медлянка–1 (ст. 29 и 73) в связи с преобладанием компонента равновесного урана окислительных условий.

Тренд участка Вербный образуют фигуративные точки поверхностных вод бассейна р. Култучная (ст. 20 и 60) и подземных вод (ст. 38). Речные воды бассейна формировались в окислительных условиях, подобных условиям формирования вод в реках Талая, Слюдянка и Похабиха.

Высокое содержание U с низким ($^{234}U/^{238}U$) (1.12±0.01) в воде ст. 45 участка Медлянка отражает ее аномальное обогащение ураном в окислительной обстановке. В речке правого распадка бассейна (ст. 64) уран не поступал в воду из-за резко восстановительных условий в породах, дренируемых речкой (очень низкие концентрации – 0.0087 мкг/л). Любая добавка урана подземными водами должна была сместить его изотопный состав в речной воде. Компонент подземных вод добавляется в речные воды левого распадка бассейна (ст. 67). На диаграмме ($^{234}U/^{238}U$) – 1/U фигуративные точки проб из речек Медлянка–1 и Медлянка–2 образуют общий тренд смешения компонента поверхностного стока с низким ($^{234}U/^{238}U$) и низкой концентрацией урана (высоким 1/U) и компонента подземных вод с повышенным ($^{234}U/^{238}U$) и повышенной концентрацией урана (пониженным 1/U) (рис. 3, *б*).

В целом поверхностные воды Култукского полигона с низкими ($^{234}U/^{238}U$) разделяются на группу с аномально низкими концентрациями урана (менее 0.009 мкг/л, компонент р. Медлянка) и группу с умеренными концентрациями урана (~0.5 мкг/л, компонент р. Култучная). Состав урана первой группы отражает резко восстановительные условия, второй – более окислительные. Возрастание ($^{234}U/^{238}U$) в поверхностных водах с промежуточными концентрациями урана (0.009–0.5 мкг/л) может свидетельствовать о примеси компонента подземных вод.

Рис. 4 иллюстрирует соотношения компонентов поверхностных и подземных вод Култукского полигона по составу урана. В случае *а* в бассейне преобладает поверхностный сток. Грунтовые (близповерхностные) воды могут примешиваться к поверхностным водам в одной части бассейна, а в другой – отсутствовать (участки Ангасолка, Тигунчиха и Слюдянка). В случае *б* наблюдается смешение компонентов поверхностного стока и деформационной зоны (участок Вербный). В случае *в* выделяются тренды смешения компонентов 1) деформационной зоны и поверхностного стока, 2) компонентов деформационной зоны и окисленных грунтовых вод и 3) компонентов деформационной зоны (участок Медлянка). На участках без постоянных водотоков происходит смешение компонентов деформационной зоны и близповерхностных грунтовых вод (участок Школьный) или компоненты деформационной зоны преобладают (участок Земляничный).

4.2. Систематика изотопов U и Sr в подземных водах

На рис. 5 поле фигуративных точек изотопных отношений U и Sr в водах Култукского полигона ограничивается кривыми линиями, сходящимися между собой в точках, соответствующих конечным компонентам E и NE. В первом уран находится в изотопном равновесии (equilibrium U, $^{87}Sr/^{86}Sr$= =0.7205, ($^{234}U/^{238}U$)=1.0), во втором – имеет сильно неравновесный состав (nonequilibrium U, $^{87}Sr/^{86}Sr$= =0.70534, ($^{234}U/^{238}U$)=3.3). Область этих точек характеризует воды из пород южной шовной зоны Сибирского кратона. Смещение фигуративных точек вод ст. 26 и 1310 правее этой области (т.е. с относительным обогащением радиогенным Sr) обусловлено латеральной сменой пород шовной зоны архейскими породами Шарыжалгайского блока Сибирского кратона (рис. 6).

В модели смешения двух компонентов с различными изотопными отношениями и концентрациями элементов форма кривых определяется значениями коэффициента K, выражающими соотношения концентраций смешивающихся элементов [*DePaolo, Wasserburg, 1976*]. В координатах изотопных отношений U и Sr имеем выражение:

$$K = \frac{(Sr/U)_{NE}}{(Sr/U)_{E}}.$$

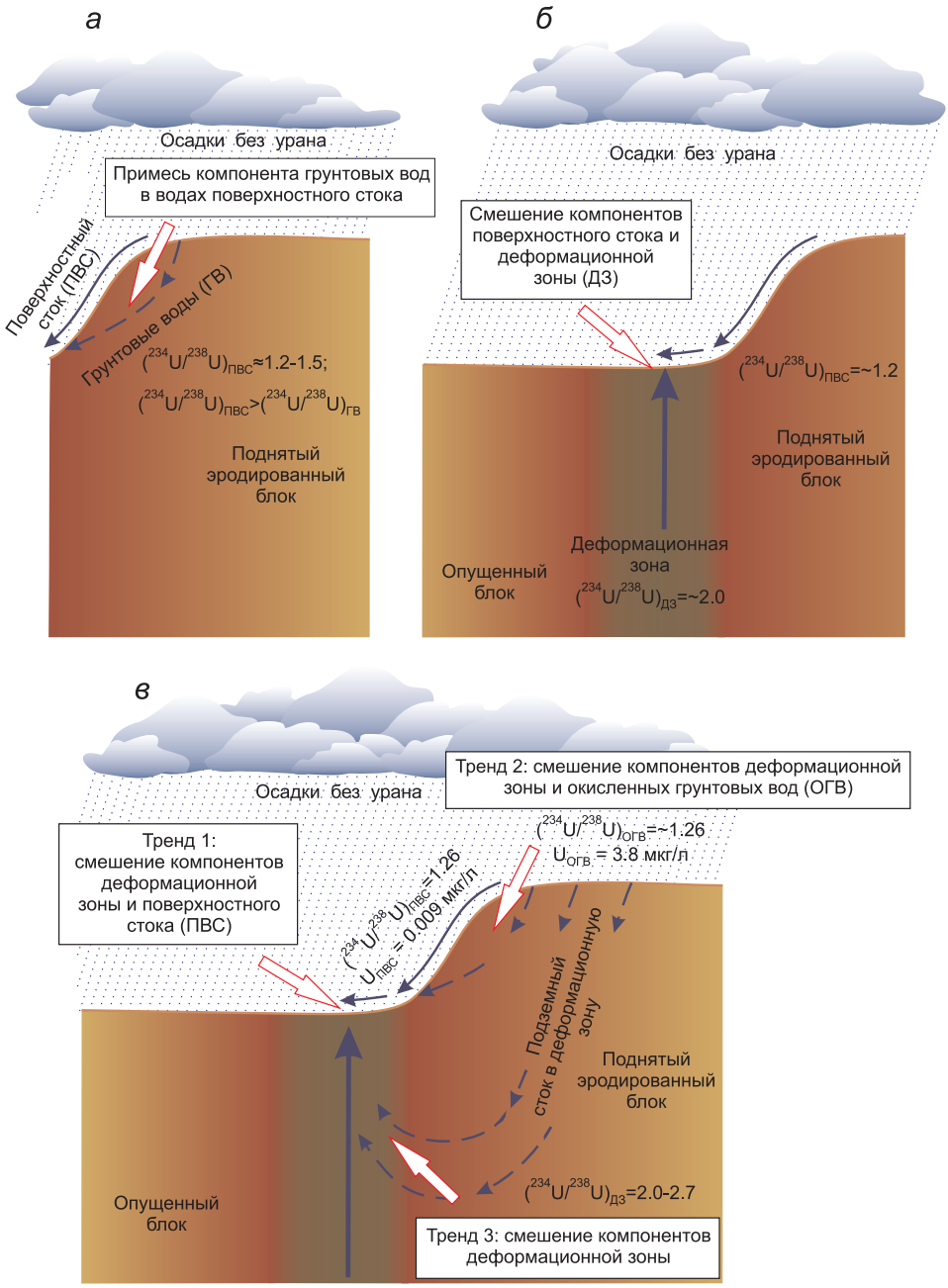


Рис. 4. Соотношения компонентов поверхностных и подземных вод на Култукском полигоне по концентрациям и отношениям активностей изотопов U (объяснения в тексте). Случаи без постоянных водотоков на рисунке не показаны.

Fig. 4. Relations between components of surface water and groundwater in the Kultuk polygon from U concentrations and isotope activity ratios (explanations are given in the text). Cases without permanent water streams are not shown.

При K<1 линия смешения представляет собой выпуклую кривую, при K>1 – вогнутую, а при K=1 – прямую линию. Основным варьирующимся параметром в модели являются концентрации U с выполнением условия: $U_E>U_{NE}$. Доля компонента E определяется линиями, параллельными оси абсцисс по логарифмической шкале (см. рис. 5, *б*).

На рис. 5, *а*, выделяются две группы вод, обособляющихся в сегменты сильнонеравновесного и слабонеравновесного U. В первом содержится около 10 % компонента E и менее, во втором – около 10 % этого компонента и более. Слабое перекрытие групп при содержании компонента E около 10 % происходит со смещением изотопного состава Sr в менее радиогенную область для группы сильнонеравновесного U ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.7079–0.7096) и в более радиогенную – для группы слабонеравновесного U ($^{87}Sr/^{86}Sr$=~0.717030).

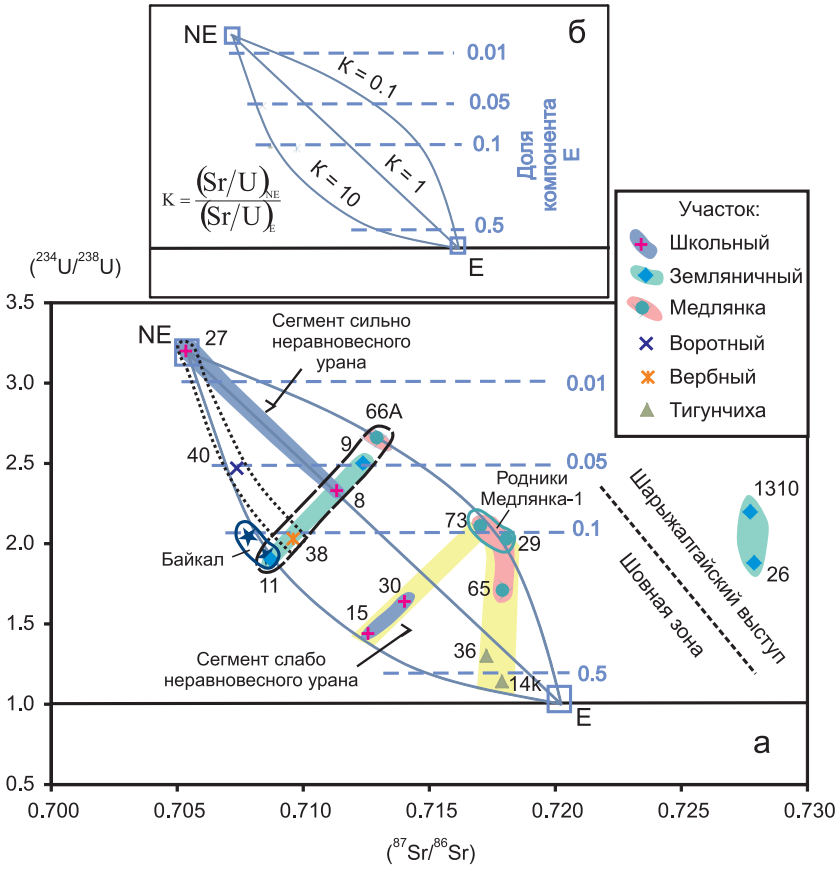


Рис. 5. Модель смешения двух конечных компонентов в водах с участков опробования Култукского полигона. На врезке *б* приведена детерминированная двухкомпонентная модель.

Конечные компоненты: E – с равновесным ураном (equilibrium U), NE – с неравновесным ураном (nonequilibrium U). Воды Байкала и родников р. Медлянка–1 соответствуют содержаниям компонента E около 10 %. В сегменте сильнонеравновесного урана доля этого компонента ниже, а в сегменте слабонеравновесного урана – выше. Возможные тренды в сегменте слабонеравновесного урана, соединяющиеся между собой в составах вод из родников р. Медлянка–1, выделены желтым цветом. Соотношения изотопов U и Sr в водах Байкала приведены по работе [*Chabaux et al., 2011*] и данным, полученным для водозабора ст. 11.

Fig. 5. A model of mixing of the two finite components in water samples from the Kultuk polygon. Insert *б* shows a deterministic two-component model.

End members: E – equilibrium U, NE – nonequilibrium U. Water samples of Lake Baikal and streams of the Medlyanka river–1 correspond to the composition with about 10 % of E component. The percentage of E component is lower in the segment of strongly nonequilibrium U and higher in the segment of weakly nonequilibrium U. Potential trends in the segment of weakly nonequilibrium U, which join each other in water from the streams of the Medlyanka river–1, are marked in yellow. Ratios of U and Sr isotopes in water from Lake Baikal are given after [*Chabaux et al., 2011*] and confirmed by the values obtained for the water intake at station 11.

В сегменте сильнонеравновесного U осевую линию образуют точки проб участка Школьный (ст. 27 и 8). Вода первой станции соответствует конечному компоненту NE, вода второй станции – середине поперечного тренда, который образуют, кроме фигуративной точки ст. 8, точки ст. 11, 9 (участок Земляничный), 38 (участок Вербный) и 66A (участок Медлянка). Точка ст. 40 (участок Воротный) располагается между точками ст. 27 (участок Школьный) и 38 (участок Вербный). Промежуточные составы изотопов U и Sr в водах участка Воротный соответствуют его промежуточному положению на местности.

По имеющейся совокупности точек сегмент сильнонеравновесного U характеризуется двумя трендами: один (ст. 38, 40, 27) отражает состав источника вод с постоянной величиной $K_{Sr/U}$, превышающей 1 (с повышенной концентрацией U), другой тренд (ст. 11, 8, 9, 66A) обозначает существенное снижение $K_{Sr/U}$ от значений, превышающих 1, до значений менее 1 (от повышенной концентрации U к низкой).

Интересно, что в области схождения двух трендов находятся фигуративные точки вод оз. Байкал при значениях $(^{234}U/^{238}U)$=1.92–2.04 и $^{87}Sr/^{86}Sr$= =0.70788–70858. Урановые изотопные отношения

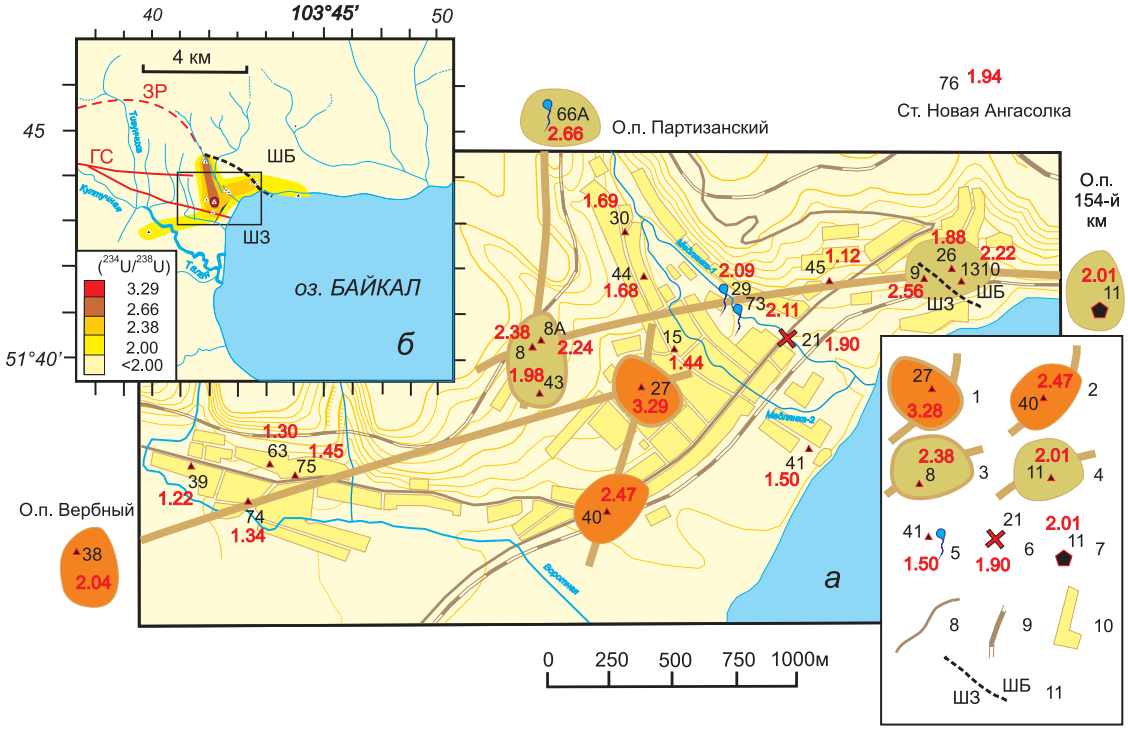


Рис. 6. Выбор станций для мониторинга подземных вод на Култукском полигоне.

На схеме *а*: *1–4* – центральные и периферические станции подземных вод опробования деформационной системы в глубоких скважинах и родниках с сильнонеравновесным U (см. рис. 5), соединенные линиями: *1* – станция 27 в центре (участок Школьный) с конечным компонентом неравновесного U (NE), *2* – периферическая станция другого участка, сопоставимая с компонентом NE при K>1, *3* – станция 8 в центре (участок Школьный), соответствующая компоненту NE по параметру K, *4* – периферическая станция другого участка, относящаяся к ряду ст. 8 с параметром K>1 (ст. 11) и K<1 (ст. 6 и 66А); *5* – станция опробования подземных вод в разноглубинных скважинах и родниках со слабонеравновесным U; *6* – станция опробования поверхностного стока; *7* – водозабор оз. Байкал; *8* – шоссейная дорога; *9* – железная дорога; *10* – строения пос. Култук; *11* – граница между породами архейского Шарыжалгайского блока (ШБ) и шовной зоны (ШЗ) на схемах *а* и *б* показана на основании пространственного распределения станций вод с различными характеристиками изотопов Sr и U (см. рис. 5), ст. 26, 1310 и 76 находятся в пределах Шарыжалгайского блока. О.п. – остановочный пункт железной дороги. На схеме *б* выделена аномалия ($^{234}U/^{238}U$) подземных вод Култукского полигона в изолиниях. Черный прямоугольник – контур территории схемы *а*. Треугольники – станции опробования. Красными линиями показаны выраженные в рельефе активные структуры, обозначенные в предшествующих работах: ЗР – дуговидный линеамент Зыркузунского разлома [*Lamakin, 1968*]; ГС – трассы сейсмодислокаций Главного Саянского разлома [*Chipizubov, Smekalin, 1999*].

Fig. 6. The schematic map showing locations of stations selected for groundwater monitoring in the Kultuk polygon.

а: 1–4 – central and peripheral stations for groundwater sampling from deep wells and springs with strongly nonequilibrium U (see Fig. 5) (the stations are connected by lines) in order to monitor the deformation system: 1 – station 27 in the centre (Shkolny site) with the end member of nonequilibrium U (NE), 2 – peripheral station on other site, which is comparable to component NE (K>1), 3 – station 8 in the centre (Shkolny site), which corresponds to component NE by parameter K, 4 – peripheral station on other site, which belongs to the line of station 8 with parameter K>1 (station 11) and K<1 (stations 6 and 66A); 5 – station of groundwater sampling from deep wells and springs with weakly nonequilibrium U; 6 – station of surface runoff sampling; 7 – water intake area of Lake Baikal; 8 – motor road; 9 – railway; 10 – buildings in Kultuk settlement; 11 – boundary between rocks of the Archean Sharyzhalgai block (ШБ) and the suture zone (ШЗ) (in schemes *a* and *b*, it is shown with respect to the spatial distribution of water samples that differ in characteristics of U and Sr isotopes; see Fig. 5); stations 26, 1310 and 76 are located within the limits of the Sharyzhalgai block. О.п. – railway station. In scheme *б*, isolines show sites with the anomalous ($^{234}U/^{238}U$) in groundwater from the Kultuk polygon. The black square marks the territory shown in scheme *а*. Triangles denote sampling stations. Red lines show active structures observed in the terrain in previous studies: ЗР – arc-shaped lineament of the Zyrkuzun fault [*Lamakin, 1968*]; ГС – seismodislocations of the Main Sayan fault [*Chipizubov, Smekalin, 1999*].

попадают в интервал значений, полученных для 36 проб вод озера (1.95±0.27) [*Edgington et al., 1996*].

В сегменте слабонеравновесного U вод Култукского полигона намечаются два тренда. Один тренд образуют подземные воды участка Медлянка (ст. 73, 29, 65) и участка Тигунчиха (ст. 36, 14k); параметр ($^{234}U/^{238}U$) снижается от 2.11 до 1.12 при узком диапазоне $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.717030–0.718067). Другой тренд намечается по составу подземных вод участков Медлянка (ст. 73) и Школьный (ст. 15 и 30); параметр ($^{234}U/^{238}U$) снижается от 2.11 до 1.30 при уменьшении $^{87}Sr/^{86}Sr$ от 0.717030 до 0.712568. В отличие от сегмента сильнонеравновесного U, в котором тренды начинаются от минимальных

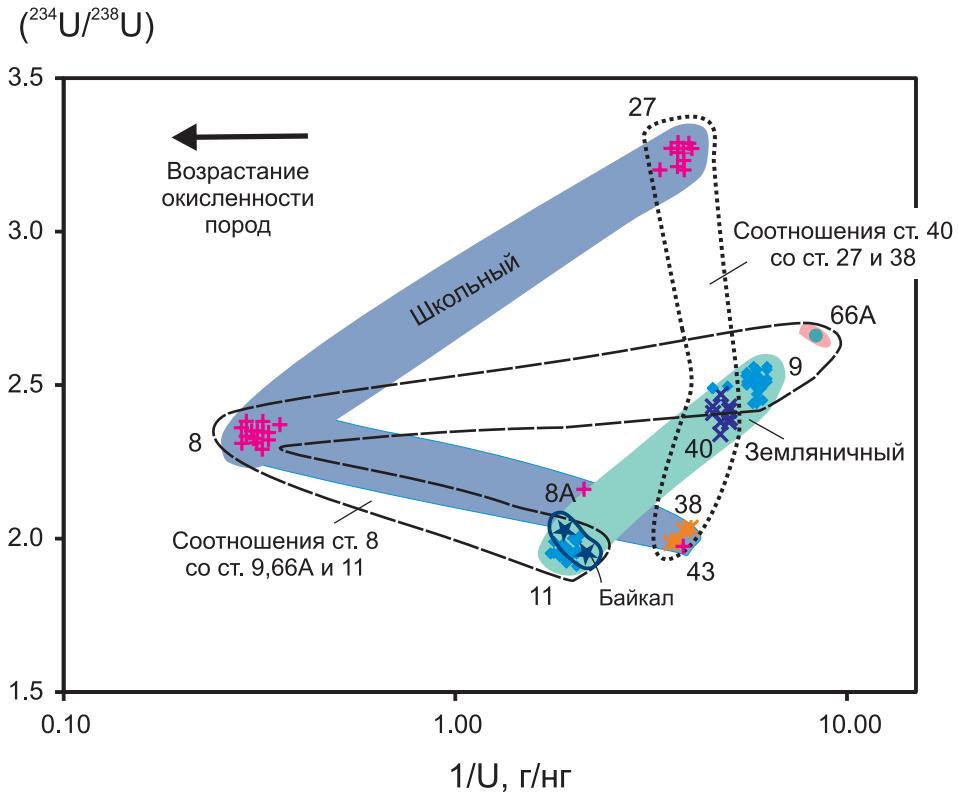


Рис. 7. Соотношения ($^{234}U/^{238}U$) и обратной концентрации урана (1/U) в подземных водах станций с сильнонеравновесным ураном. Усл. обозн. фигуративных точек станций см. рис. 5. Состав U в водах Байкала из работы [*Chabaux et al., 2011*] близок составу вод из водозабора оз. Байкал (ст. 11).

Fig. 7. ($^{234}U/^{238}U$) versus 1/U in groundwater with strongly nonequilibrium uranium. See the legend of the data points of the stations in Fig. 5. The U composition in water of Lake Baikal, that is described in [*Chabaux et al., 2011*], is similar to that in water from the water intake of Lake Baikal (station 11).

($^{234}U/^{238}U$) и направлены в сторону повышения неравновесности, в сегменте слабонеравновесного U тренды начинаются от общего максимума ($^{234}U/^{238}U$) и направлены в сторону снижения неравновесности.

Из общего анализа трендов сегментов сильно- и слабонеравновесного U следует вывод об отчетливой зависимости изотопного состава U и Sr в водах шовной зоны Сибирского кратона на Култукском полигоне от соотношений концентраций этих элементов. Согласованное распределение изотопов U и Sr свидетельствует об избирательном проявлении эффекта Чалова–Чердынцева при совместном извлечении водами обоих элементов. Ключевое значение имеет источник, обеспечивающий $K_{Sr/U}$=1 в сегменте сильнонеравновесного U. Условие пропорционального распределения этих элементов выполняется в водах участка Школьный (ст. 27 и 8). От первой ко второй концентрации U повышаются относительно Sr с относительным снижением ($^{234}U/^{238}U$). От ст. 8 выявляется веерное распределение точек: к составам ст. 8А, 43 в пределах участка Школьный и к составам ст. 9, 66А, 11 – за его пределами.

Изотопная систематика урана и стронция сегмента сильнонеравновесного U дополняется систематикой урана в координатах ($^{234}U/^{238}U$) – 1/U (рис. 7). Состав урана в водах ст. 40 отражает сочетание процессов, протекающих на ст. 27, в центре деформационной системы, и на ее периферии, на ст. 38. Приблизительно равные содержания U на всех трех станциях могут отражать близкую степень окисленности среды.

Обеднение ураном вод ст. 9 и 66А (повышение 1/U), по сравнению с водами ст. 40, может свидетельствовать о повышенной восстановленности среды. Тренд смешения протягивается к водам оз. Байкал с относительным возрастанием фактора окисленности в извлечении урана.

Субпараллельное снижение ($^{234}U/^{238}U$) и 1/U в водах трендов Школьный и Земляничный – Байкал (8, 27 и 11, 9) на диаграмме рис. 7 обозначает уменьшение избытка ^{234}U с повышением концентраций равновесного компонента U.

Связывая ($^{234}U/^{238}U$) в водах с вариациями окисленности и деформациями среды, мы предполагаем следующее.

1. Деформационная система Култукского полигона имеет конечные размеры, в ней различаются центральная и периферическая части.

2. В центральной части находится ст. 27, воды которой извлекаются в восстановительных условиях из резервуара, заключенного в сильнодеформированных породах. Максимальное ($^{234}U/^{238}U$) и минимальное $^{87}Sr/^{86}Sr$ могут обеспечиваться свободной циркуляцией вод в центре пересечения субширотного и субмеридионального разрывов.

3. В центральной части полигона расположена также ст. 8, в водах которой сохраняется пропорция концентраций U и Sr ст. 27, но при повышенном содержании U. В отличие от ст. 27, развитие деформаций в среде проникновения вод ст. 8, возможно, подчинено преимущественно субширотному разрыву (см. рис. 6).

4. В водах периферических станций деформационной системы полигона пропорции концентраций U и Sr, характерные для центральной части деформационной системы (участка Школьный), нарушены. На ст. 11 уран извлекается легче стронция из-за повышенной окисленности среды, а на ст. 9 и 66А, наоборот, поступает в меньшем количестве из-за слабой окисленности.

Исходя из систематики изотопов U и Sr в подземных водах Култукского полигона, мониторинг ($^{234}U/^{238}U$), организуемый с целью сейсмического прогноза, направлен на прослеживание соотношений процессов в центральной и периферической частях деформационной системы. С одной стороны, необходимо вести режимные наблюдения ст. 27, 40 и 38, с другой стороны – ст. 8, 11, 9, 76 и 66А.

4.3. Временные вариации ($^{234}U/^{238}U$) в подземных водах и их связь с сейсмическими событиями

По данным Иркутской сейсмической станции [*Мар..., 2013*], в течение начального периода исследований вод в районе Южно-Байкальской впадины признак активизации проявился 08.01.2013 г. в землетрясении с энергетическим классом $К_р$=11.2 с эпицентром рядом с пос. Листвянка (51.85° с.ш., 105°16 в.д.), на удалении от пос. Култук приблизительно на 100 км к востоку вдоль Обручевского разлома. Затем произошло землетрясение 10-го класса в районе пос. Култук 24.04.2013 г. Новая сейсмическая активизация 07.06.2013 г. выразилась в двух сейсмических толчках с $К_р$=9.1 и 9.9 с 30-секундным перерывом между ними в эпицентре, расположенном северо-восточнее Култукского полигона (51.69° с.ш., 103°86 в.д.).

Проследим временные вариации ($^{234}U/^{238}U$) на примере результатов измерений этого параметра в пробах вод ст. 9. Начальная проба, отобранная 31.07.2012 г., показала значение ($^{234}U/^{238}U$)=2.44± ±0.02. Последующие пять проб временного интервала с 05.08.2012 г. до 26.10.2012 г. обозначили последовательное возрастание ($^{234}U/^{238}U$) до 2.56± ±0.03. Рост приостановился только 16.09.2012 г. и 06.10.2012 г. на значении 2.53±0.02. С 26.10.2012 г. до 10.01.2013 г. регистрировалось последовательное снижение ($^{234}U/^{238}U$) по пяти пробам от максимума 2.56±0.03 до минимума 2.47±0.02 (рис. 8).

При дальнейшем отборе проб вод ст. 9 выявилось чередование максимумов и минимумов ($^{234}U/^{238}U$). За все время наблюдений выделилось девять максимумов и десять минимумов, составляющих девять полных циклов (табл. 2). Амплитуды циклов на этой станции превышают ошибку измерений в два–четыре раза.

Связывая вариации ($^{234}U/^{238}U$) с колебательным характером текущих деформаций, мы обозначаем первый максимум как отражение сравнительно длительного деформационного цикла, начавшегося 31.07.2012 г. (или несколько раньше) и продолжавшегося не менее пяти месяцев и десяти дней. Затем последовали менее длительные деформационные импульсы, первый из которых продолжался два месяца и шесть дней, а второй составил два с половиной месяца и сменился максимумом в интервале 08.06.2013 г. – 16.06.2013 г.

В пробе воды, отобранной на ст. 9 через два дня после события с эпицентром у пос. Листвянка, значение ($^{234}U/^{238}U$) оставалось на минимуме (2.47), но уже через девять дней (19.01.2013 г.) возросло до 2.52. Максимуму второго наложенного деформационного импульса соответствовало сейсмическое событие 10-го класса 24.04.2013 г. с эпицентром на Култукском полигоне. Перед следующим сейсмическим событием, произошедшим 7.06.2013 г., проба воды была отобрана за шесть дней и дала минимальное значение ($^{234}U/^{238}U$)=2.44. Проба воды, отобранная через 17 часов после события, дала высокое значение – 2.53. Два последующих измерения (13.06.2013 г. и 16.06.2013 г.) показали значения, поддерживающиеся на этом же уровне.

На рис. 9 приводится график временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 9 без обозначения ошибок в сопоставлении с подобными графиками для ст. 11 и 8. В начальный период наблюдений ст. 9 линия средних значений ($^{234}U/^{238}U$) для циклов находилась на уровне 2.50, а с переходом к предсейсмогенному состоянию 16.03.2013 г. снизилась до 2.48. Первое событие на полигоне (24.04.2013 г.) произошло при низком положении средней линии циклов, второе событие (07.06.2013 г.) – при ее поднятии. После события поднятие продолжалось до 9.07.2013 г. с последующим переходом к понижению.

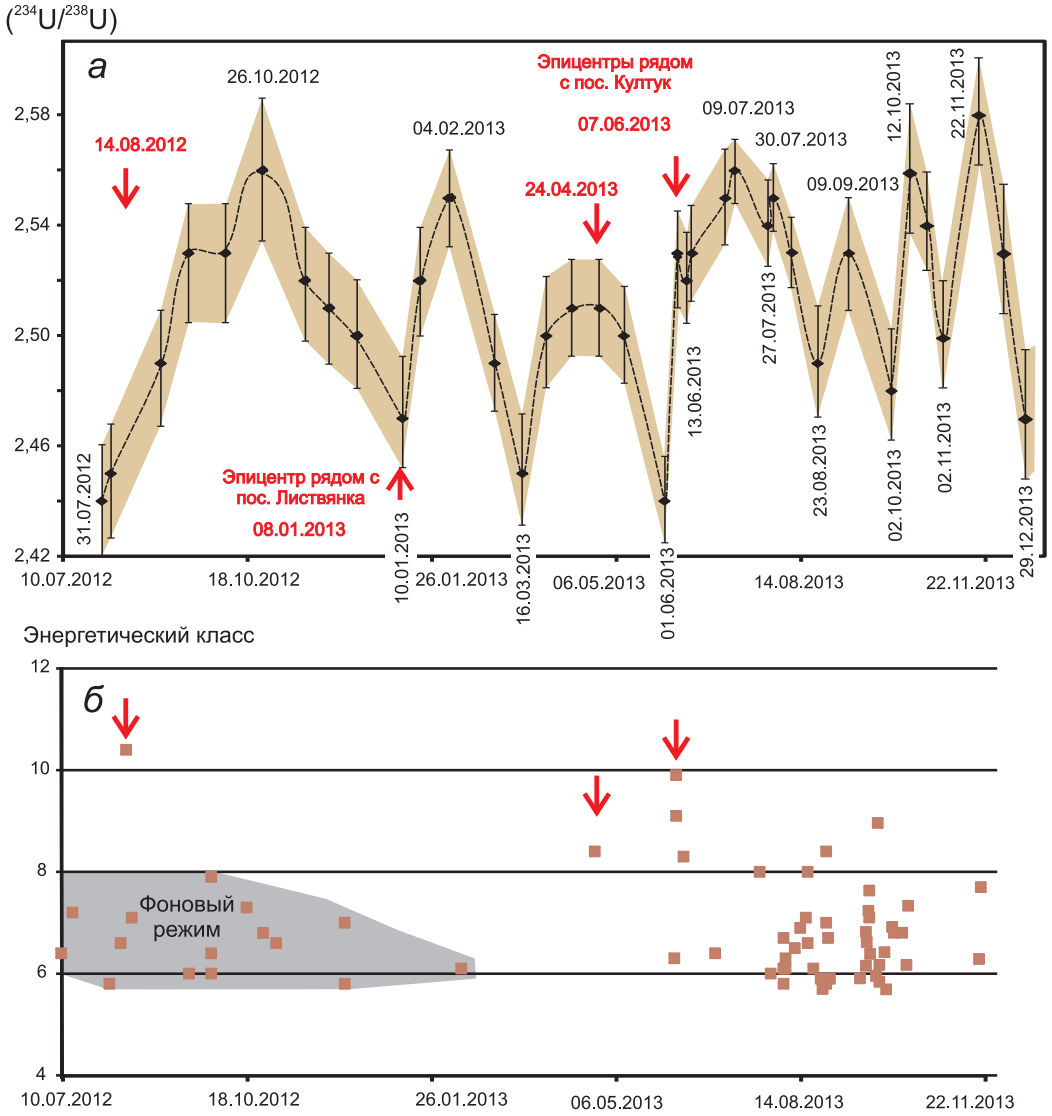


Рис. 8. Сопоставление временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) на ст. 9 с ключевыми сейсмическими событиями в районе Култукского полигона (*а*) и общий ход слабых и более сильных сейсмических событий (*б*).

На диаграмме *а* показано время максимумов и минимумов ($^{234}U/^{238}U$). Отрезок ошибки измерений ±1σ. На диаграмме *б* использованы данные Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН для территории с координатами 51.20°–52.00° с.ш., 103.30°–104.30° в.д. Событию 24.04.2013 г. и последующей нестабильности на полигоне предшествовал фоновый режим квазиравномерного распределения событий 6–8-го класса (выделено серым фоном) и перерыв.

Fig. 8. *а* – correlation between temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) at station 9 and the main seismic events in the Kultuk polygon; *б* – general sequence of weak and stronger seismic events.

Diagram *а* shows timing of maximum and minimum ($^{234}U/^{238}U$). Determination error: ±1σ. Diagram *б* uses data provided by the Baikal Branch of the Geophysical Survey of SB RAS for the territory with the coordinates: 51.20°–52.00°N, 103.30°–104.30°E. The background regime with the quasi-regular scatter of events of classes 6 to 8 (marked in grey) and an activity gap were recorded prior to the seismic event on 24 April 2013, which was followed by the state of instability in the Kultuk polygon.

На ст. 11 (рис. 9, *б*) выявляется переход от существенных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в интервале от 05.08. 2012 г. до 01.03. 2013 г. к малым вариациям на уровне значений ($^{234}U/^{238}U$) в воде оз. Байкал (1.94–1.96, среднее значение 1.95), продолжавшимся в течение шести месяцев (до 09.09.2013 г.). Период малых вариаций закончился к 03.10.2013 г., когда произошло относительное возрастание ($^{234}U/^{238}U$) до 1.99. Ст. 11 фиксирует состав вод у берега Байкала в зоне Обручевского разлома. Отклонения ($^{234}U/^{238}U$) от отношения, характеризующего основную массу воды озера, по-видимому, отражали эффекты разбавления прибрежных вод за счет подземного стока в зоне разлома. Соответствие изотопному составу урана озера указывало на прекращение этого подземного стока.

Таблица 2. **Максимумы и минимумы ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 9**

Table 2. **Maximum and minimum ($^{234}U/^{238}U$) ratios in water samples from station 9**

№ цикла	День, месяц, год	Минимум	Максимум
1	31.07.2012	2.44±0.02	
	26.10.2012		2.56±0.03
2	10.01.2013	2.47±0.02	
	04.02.2013		2.55±0.02
3	16.03.2013	2.45±0.02	
	24.04.2013		2.51±0.02
4	01.06.2013	2.44±0.02	
	08.06.2013		2.53±0.02
5	13.06.2013	2.52±0.02	
	09.07.2013		2.56±0.01
6	27.07.2013	2.54±0.02	
	30.07.2013		2.55±0.02
7	23.08.2013	2.49±0.02	
	09.09.2013		2.53±0.02
8	02.10.2013	2.48±0.02	
	12.10.2013		2.56±0.02
9	02.11.2013	2.48±0.02	
	22.11.2013		2.58±0.02
10	29.12.2013	2.47±0.02	

В начале периода наблюдений между ст. 9 и 11 наблюдалось резкое несоответствие в значениях ($^{234}U/^{238}U$): минимуму ст. 9 соответствовал максимум ст. 11. В длительный деформационный цикл 31.07.2012 г. – 10.01.2013 г. ст. 9 укладывался один максимум ($^{234}U/^{238}U$) ст. 11, отделенный от предшествующего максимума минимумом ($^{234}U/^{238}U$) 06.10.2012 г. и от последующего – минимумом ($^{234}U/^{238}U$) 16.12.2012 г. Усредненная линия графика ст. 11 описала синусоиду, первая часть которой сопоставляется с длительным деформационным циклом ст. 9, а вторая – с циклом, последовавшим после удаленного лиственского сейсмического события 08.01.2013 г. Это землетрясение не отразилось в повышении ($^{234}U/^{238}U$) в воде ст. 9 10.01.2013 г. В воде ст. 11 оно уже начало повышаться. Далее, можно видеть совпадение максимумов ст. 9 и 11 с переходом на обеих станциях к минимуму 16.03.2013 г. Дальнейшее развитие деформационных процессов выражено в отсутствии существенных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в воде ст. 11 с распределением точек на уровне средних значений в воде оз. Байкал (~1.95). В этот период на Култукском полигоне произошли сейсмические события.

Обратимся к вариациям ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 8 (рис. 9, *в*). В первой половине периода наблюдений кривая ст. 8 была подобна кривой ст. 11. Из трех минимумов ($^{234}U/^{238}U$) два (06.10.2012 г. и 16.03.2013 г.) совпадают, а один минимум несколько смещен по времени (ст. 8 – 01.12.2012 г., ст. 11 – 16.12.2012 г.). После минимума 16.03.2013 г. на обеих станциях наблюдается затухание амплитуды относительных вариаций ($^{234}U/^{238}U$). До сейсмических событий среднее значение ($^{234}U/^{238}U$) ст. 8 находилось на уровне 2.34. Перед сейсмическими событиями в апреле 2013 г. линия начала подниматься. Землетрясения произошли на фоне этого подъема, а в дальнейшем повышение ($^{234}U/^{238}U$) прекратилось с переходом к понижению.

На рис. 10 приводятся графики временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 40 и 27. Временной интервал наблюдений на первой станции (диаграмма *а*) разделяется на три отрезка: 1) 12.04. – 04.07.2013 г., 2) 04.07 – 21.10.2013 г. и 3) 21.10.2013 г. – 17.01.2014 г. Начальный и конечный отрезки сходны между собой по резкому снижению кривой с четко выраженной ступенью ($^{234}U/^{238}U$) в средней части, минимумом и последующим поднятием кривой. Временной интервал между сопоставимыми частями этих отрезков составлял 5–6 месяцев. Промежуточный отрезок обозначил крутой рост средних значений ($^{234}U/^{238}U$) в диапазоне 2.34–2.47 ед. активности со средней скоростью около 0.2 ед./год.

На ст. 27 также выделяется отрезок нисходящей кривой со ступенью, минимумом и восходящей кривой, частично совпадающий по времени с начальным отрезком ст. 40. Землетрясения Култукского полигона пришлись на согласующиеся во времени ступенчатые части кривых этих станций. По сходной конфигурации линии конечного отрезка наблюдений ст. 40 можно было бы предположить, что образование ступени на нисходящей кривой должно было также сопровождаться землетрясениями. Однако землетрясений не произошло. В связи с этим обращаем внимание на отсутствие одновременного проявления ступенчатой конфигурации на ст. 27. По-видимому, для реализации сейсмического события косейсмическая ступень должна быть выражена на обеих станциях.

4.4. Косейсмическая синхронизация ($^{234}U/^{238}U$)

Сейсмические процессы контролируются триггерами, обеспечивающими эффект синхронизации. Причиной его проявления могут быть процессы самоорганизации. Интервалы синхронизации колебаний, подобно форшоковой активизации, являются признаками неустойчивого состояния сейсмоактивной области [*Sobolev et al., 2005*]. Подобную информацию о переходе в предсейсмогенное состояние можно получить из анализа вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах из активных разломов.

В начальный интервал наблюдений деформационная система Култукского полигона (ст. 8, 9 и 11) развивалась медленно, с периодичностью

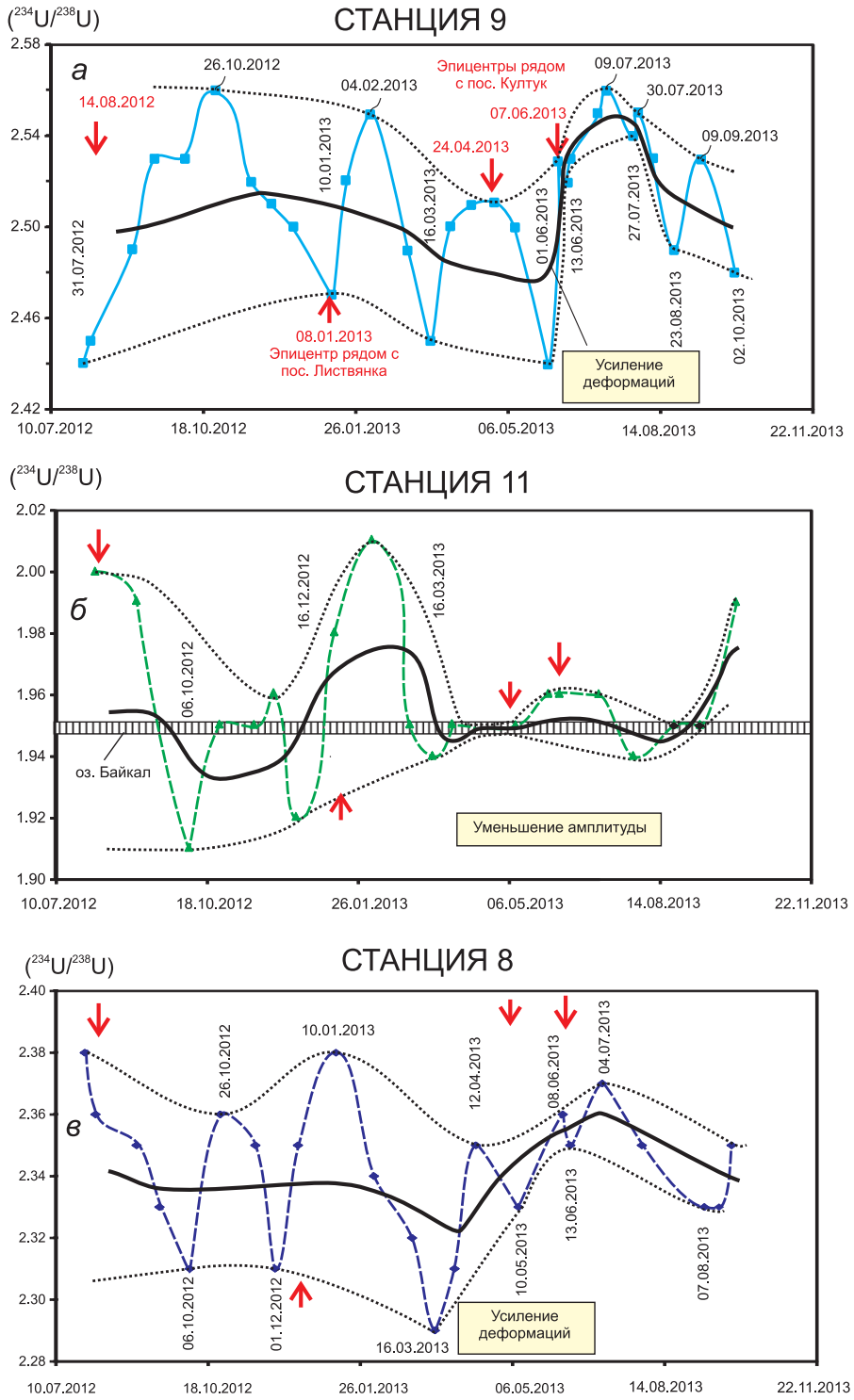


Рис. 9. Временные вариации ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 9, 11 и 8. Для упрощения диаграммы погрешности измерений проб не показаны.

Пунктиром выделены огибающие кривые минимумов и максимумов, жирной линией – средние значения для циклов. Более шести месяцев (с 01.03.2013 г. до 09.09.2013 г.) на станции 11 выдерживался узкий интервал ($^{234}U/^{238}U$) (1.94–1.96), соответствующий среднему составу урана в воде оз. Байкал. На станции 8 ($^{234}U/^{238}U$) резко повышалось (усиливались деформации) в начале 6-месячного временного интервала, а на станции 9 – в конце.

Fig. 9. Temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) in water from stations 9, 11, and 8. For simplicity of the diagrams, determination errors are not shown.

Dashed lines show envelope curves of maximum and minimum values; thick lines mark average values for the cycles. For more than six months, from 01 March 2013 to 09 September 2013, a narrow interval of ($^{234}U/^{238}U$) (from 1.94 to 1.96) was observed at station 11, which corresponded to an average composition of uranium in water from Lake Baikal. The ($^{234}U/^{238}U$) was abruptly increased (higher strain) at the beginning of the six-month interval at station 8 and at the end of the six-month interval at station 9.

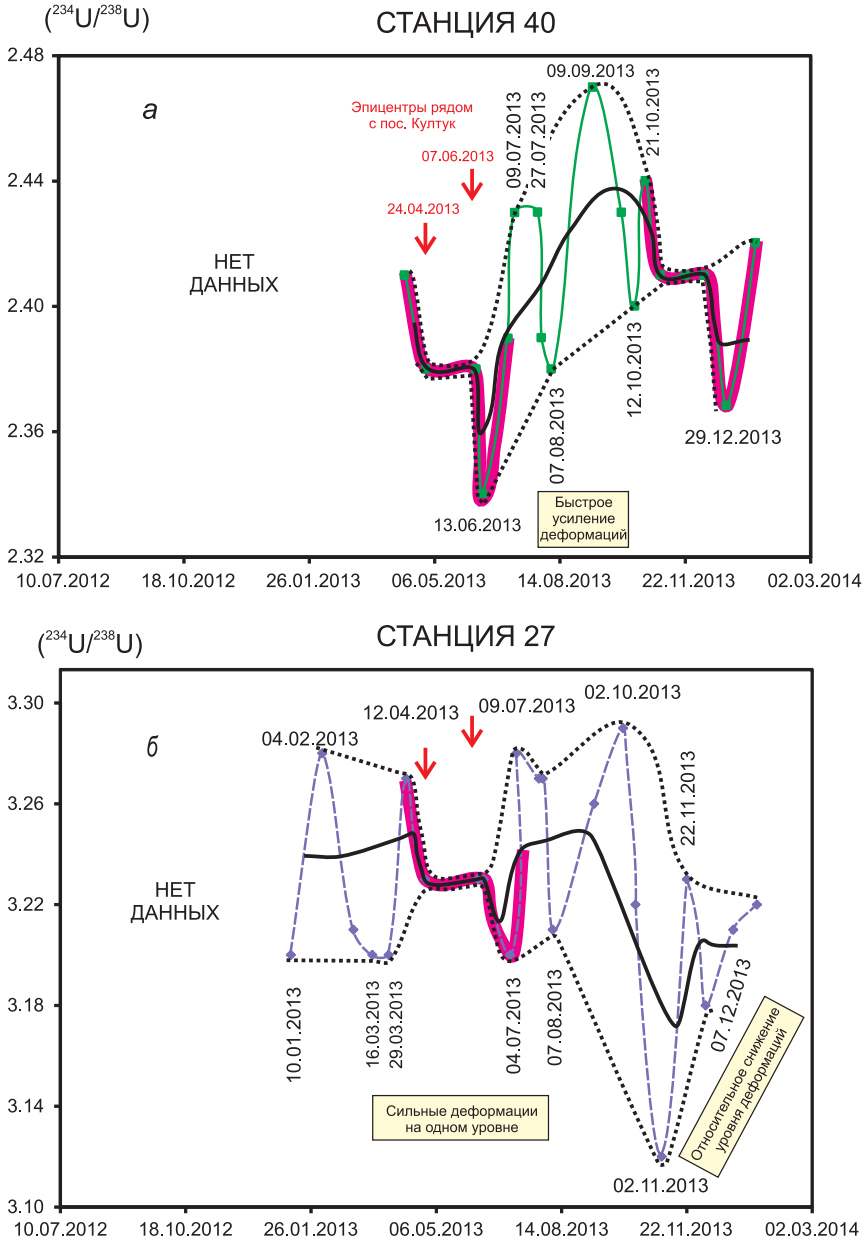


Рис. 10. Временные вариации ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 40 и 27.

Усл. обозн. см. рис. 9. Наблюдения на ст. 40 начались 12.04.2013 г., на ст. 27 – 10.01.2013 г. На диаграмме *а* сиреневой широкой линией обозначены отрезки сходной конфигурации в начале и в конце интервала наблюдений, на диаграмме *б* – отрезок наблюдений ст. 27, подобный по конфигурации началу интервала наблюдений ст. 40, во время которого произошли землетрясения.

Fig. 10. Temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) in water from stations 40 and 27.

See the legend in Fig. 9. The monitoring session started on 10 January 2013 at station 27 and on 12 April 2013 at station 40. In diagram *a*, the thick mauve line marks segments of the initial configuration at the start and end of the monitoring period. In diagram *б*, it marks the monitoring interval at station 27, which configuration is similar to the start of the monitoring period at station 40, within which the earthquakes took place in the Kultuk polygon.

110–170 дней/цикл (рис. 11). В момент предсейсмогенной синхронизации циклов ст. 11 находилась в таком же медленном деформационном режиме (133 дня/цикл), а ст. 8 и 9 перешли на менее длительные циклы (от 13 до 56 дней/цикл). На этом этапе начала проявляться зональность цикличности относительно деформационного центра. Периферическая ст. 11 показывала длительный цикл (133 дня), ст. 9 и 40, занимающие промежуточное пространственное положение, – циклы с промежуточной длительностью (55–56 дней/цикл), а ст. 8 и 27, расположенные в центре

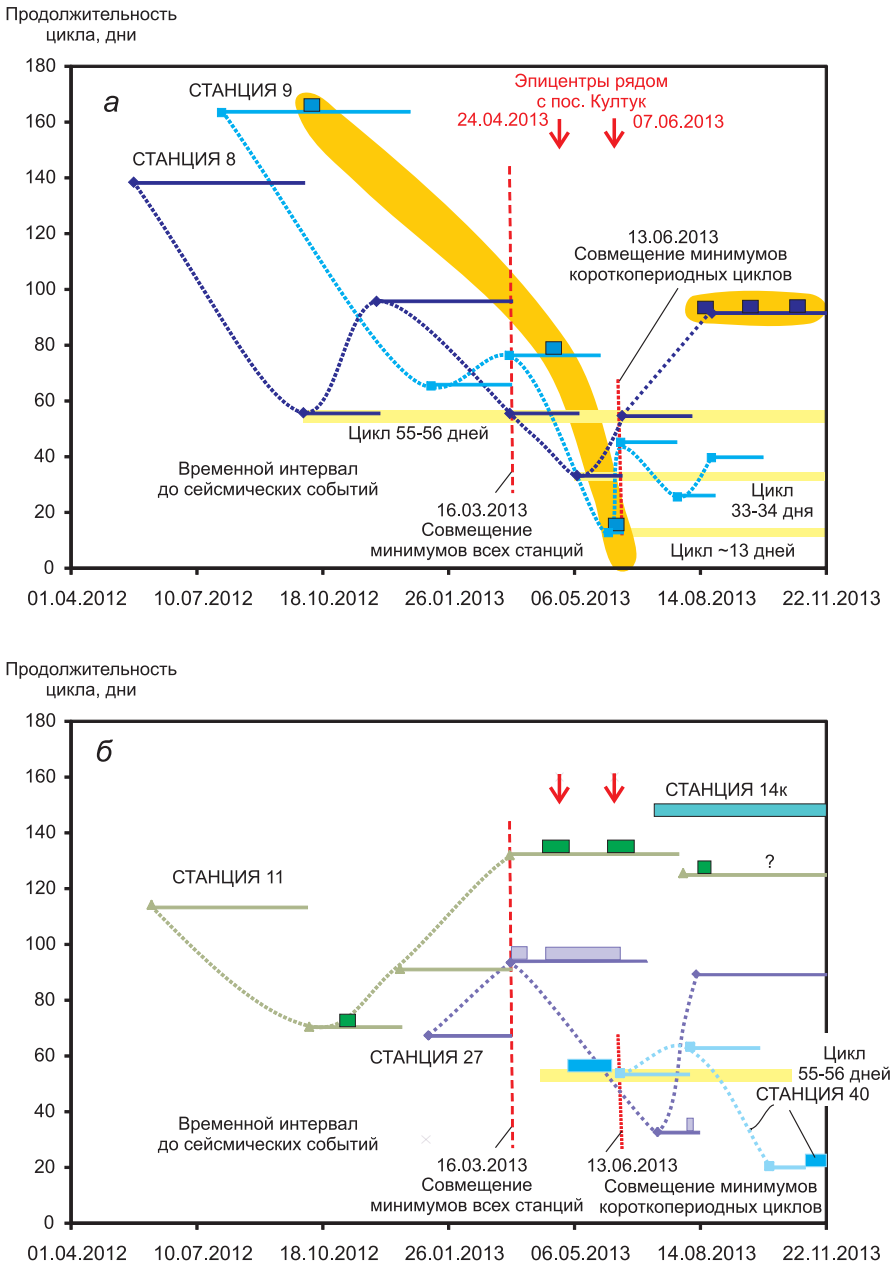


Рис. 11. Сопоставление временных изменений длительности циклов ($^{234}U/^{238}U$) в водах ст. 9, 8, 11 и 27.

Фигуративная точка каждой станции соответствует началу цикла с минимальным значением ($^{234}U/^{238}U$). Жирная линия, параллельная оси абсцисс, протягивается от начала до конца цикла. Прямоугольниками разного цвета выделены малоамплитудные эпизоды разных станций. На диаграмме *а* светло-желтые полосы, параллельные оси абсцисс, объединяют одинаковые короткопериодные циклы разных станций, а широкие темно-желтые полосы – малоамплитудные эпизоды ст. 9 и 8. Наименее продолжительный цикл ~13 дней определен на ст. 8. Вертикальными красными штриховыми линиями на обеих диаграммах выделен временной интервал синхронизации циклов на разных станциях, соответствующий проявлению сейсмических событий 10-го класса. Для начальных циклов ст. 9 и 11 условно принята полная продолжительность, исходя из зарегистрированных половин. На диаграмме *б* показан малоамплитудный продолжительный интервал (153 дня) ст. 14к, расположенной на сейсмодислокации Главного Саянского разлома в долине р. Тигунчиха (местоположение см. рис. 2). Длительный цикл ст. 11 на момент подготовки настоящей работы пока не завершен.

Fig. 11. Comparison of temporal variations of ($^{234}U/^{238}U$) cycle duration recorded in water from stations 9, 8, 11, and 27.

An data point of each station corresponds to the start of the cycle with a minimum ($^{234}U/^{238}U$). A thick line parallel to abscissa goes from the start to the end of the cycle. Rectangular boxes of different colours show small-amplitude episodes for different stations. In diagram *a*, light-yellow lines parallel to abscissa connect similar short-term cycles of different stations; thick dark-yellow lines connect small-amplitude episodes of stations 9 and 8. The shortest cycle (~13 days) is revealed for station 8. In both diagrams, red vertical dashed lines mark the time interval when the cycles at different stations were synchronized; it correlates with the occurrence of the earthquakes (class 10). For stations 9 and 11, it is assumed that the initial cycles comprise two half-cycles registered. Diagram *б* shows the long period of time (153 days) with low amplitudes at station 14к that is located at the seismodislocation of the Main Sayan fault in the Tiguchikha river valley (the location is shown in Fig. 2). The long-term cycle at station 11 was incomplete when this paper was under preparation.

деформационной зоны, – циклы с малой длительностью (13–34 дня/цикл).

Первые признаки предсейсмогенного состояния на полигоне обозначились совмещением минимумов в циклах всех станций 16.03.2013 г. После общего совмещения минимумов через тридцать девять дней произошло первое сейсмическое событие (24.04.2013 г.). В предсейсмогенном состоянии стали проявляться сравнительно короткие периоды циклов. Второе сейсмическое событие (07.06.2013 г.) отразилось в совмещении минимумов короткопериодных циклов ст. 8, 9 и 40 (рис. 11).

Два задокументированных цикла ст. 27 (с 10.01.2013 г. до 16.03.2013 г. и с 04.07.2013 г. до 07.08.2013 г.) согласуются с циклами ст. 8, а два цикла ст. 40 (с 13.06.2013 г. до 07.08.2013 г. и с 07.08.2013 г. до 02.10.2013 г.) – с циклами ст. 9. Циклы ст. 40 имели продолжительность 55–56 дней. На ст. 9 проявилось три цикла с такой же продолжительностью. Циклы продолжительностью 55–56 дней могут рассматриваться как характерные для ст. 9 и 40.

Время наблюдений на Култукском полигоне разделяется на два интервала, начинающихся: 1) 10.07.2012 г. и 2) 07.08.2013 г. Первый рассматривается в связи с подготовкой и проявлением на полигоне сейсмических событий 10-го класса, второй – в связи с дальнейшей эволюцией деформационной системы, которая может перейти в новое сейсмогенное состояние.

Интервал 10.07.2012 г. – 07.08.2013 г. включает три временных отрезка, начинающихся: 1) 10.07.2012 г., 2) 10.01.2013 г. и 3) 12.04.2013 г. (рис. 12). В начале разработки полигона, на первом временном отрезке, регистрировалось изменение ($^{234}U/^{238}U$) трех станций: 11, 9 и 8. На ст. 11 и 8 вариации этого параметра были согласованы между собой в интервале 29.07.–26.10.2012 г., а на ст. 9, расположенной между ними, – находились в противофазе. Второй цикл ст. 9 начинался 10.01.2013 г. на минимуме с запаздыванием на 25 дней относительно минимума цикла ст. 11. Максимумы обоих циклов совместились между собой 04.02.2013 г. Таким образом, на первом этапе проявилась тенденция перехода от асинхронности к синхронизации ст. 11 и 9.

По-видимому, ст. 11 и 9 были синхронизированы уже 19.01.2013 г., т.е. на восходящей линии второго цикла ст. 9. Несколько раньше (10.01.2013 г.) синхронизировались ст. 9 и 27 (см. рис. 11) с согласованием вариаций ($^{234}U/^{238}U$) на этих станциях в течение 66 дней (до 16.03.2013 г.). Во второй половине марта 2013 г. синхронность ст. 11 и 9, 27 и 9 сменилась основной синхронностью ст. 8 и 9, продолжавшейся 131 день. Характер произошедшей смены и промежуточная пространственная ориентировка ст. 8 и 9 относительно ст. 11 и 9, 27 и 9 могут отражать первоначально рассредоточенные (веерные) деформации в субширотном секторе от 69 до 272° и их последующую концентрацию по направлению 80°.

Усиление деформаций вдоль линии 8–9 сопровождалось их проявлением вдоль линии ст. 40 и 27 (субмеридиональное направление 14°), что выразилось в синхронизации ($^{234}U/^{238}U$) этих станций (рис. 13). Наблюдения на ст. 40 начались 12.04.2013 г. Первые пробы выявили ее синхронизацию со ст. 27, продолжавшуюся затем до 08.06.2013 г. На обеих станциях значения ($^{234}U/^{238}U$) снизились и воспроизводились на одном уровне во временном интервале с 27.04.2013 г. до 08.06.2013 г. Пробы, отобранные на этих станциях, показали асинхронное смещение значений ($^{234}U/^{238}U$) 13.06.2013 г. С интервалом синхронизации ст. 40 и 27 совпали сейсмические события 9–10-го класса 24.04.2013 г. и 07.06.2013 г. Первое событие соответствовало началу линий обеих станций, параллельных оси абсцисс, второе – их окончанию (рис. 13). Первое событие обозначило активизацию деформаций коры по субмеридиональному направлению, а второе – их прекращение.

Анализируя конфигурацию кривой ст. 40, нетрудно заметить сходство ее отрезков в косейсмичном интервале (12.04.2013 г. – 08.06.2013 г.) и в конечном интервале наблюдений (21.10. – 07.12.2013 г.), в котором сейсмических событий не произошло. В обоих случаях линии снизились и затем протянулись параллельно оси абсцисс. Конечному асейсмичному интервалу ст. 40 соответствует глубокий минимум ($^{234}U/^{238}U$) на ст. 27. Хотя на конечном отрезке наблюдений косейсмичная конфигурация вариационной линии ст. 40 и повторилась, ее асинхронность со ст. 27 свидетельствует об отсутствии активности структур в субмеридиональном направлении (и соответствующей реализации деформаций в сейсмических событиях).

Интересно, что в момент выхода 02.12.2013 г. ст. 40 на линию, субпараллельную оси абсцисс, произошла синхронизация ст. 27 со ст. 9, которая свидетельствовала о деформационной активности структур по субширотному направлению 69°. По другим направлениям станции Култукского полигона оставались несинхронизированными между собой.

На фоне хаотического состояния системы наблюдений Култукского полигона выделяются фазы *а–г* последовательной самоорганизации, выраженной в азимутальной синхронизации станций. Пространственный ход зарегистрированных процессов представлял собой последовательность сейсмогенной активизации западного окончания Обручевского разлома (рис. 14).

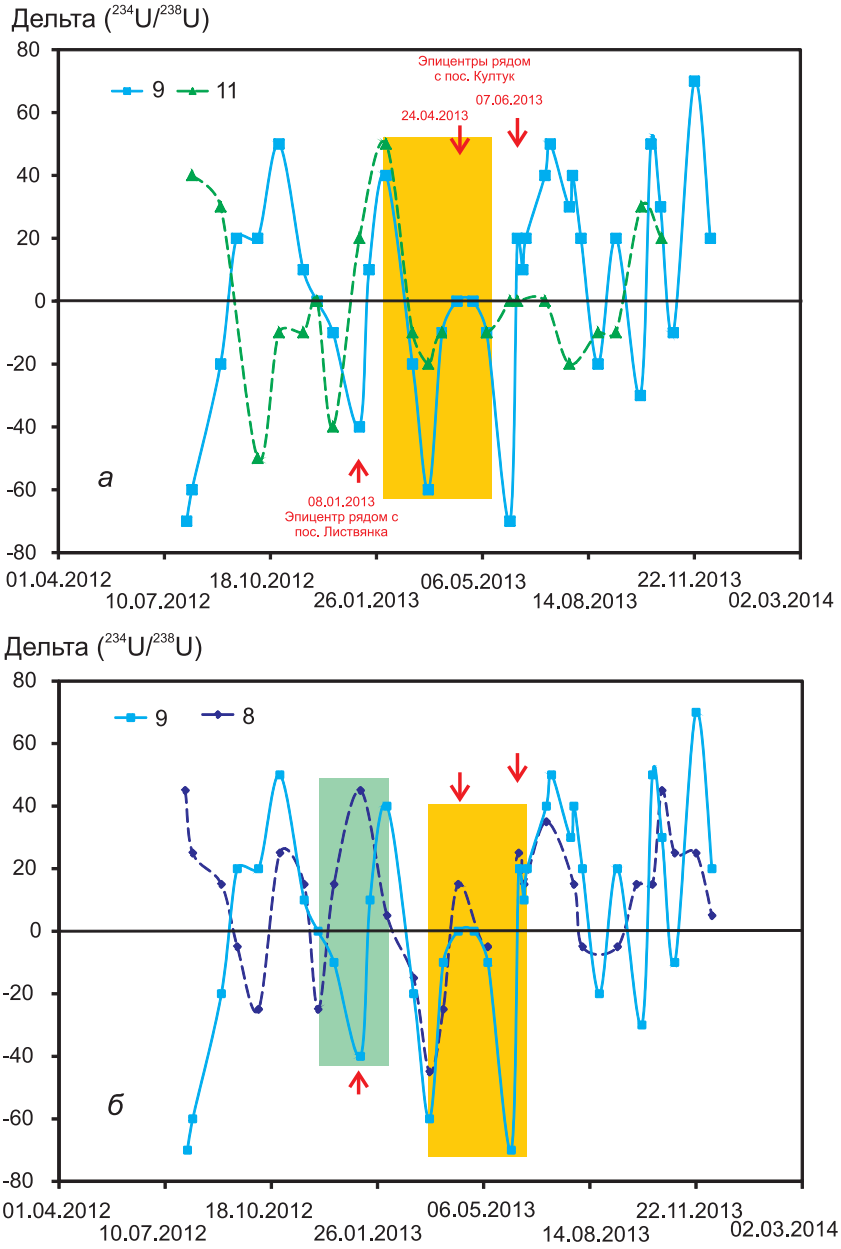


Рис. 12. Сопоставление циклов станций 9 и 8 (*а*), 9 и 11 (*б*). Дельта $(^{234}U/^{238}U)=1000\times((^{234}U/^{238}U)_{измеренное}-(^{234}U/^{238}U)_{медианное})$. $(^{234}U/^{238}U)_{медианное}$ ст. 9 = 2.51, ст. 8 – 2.335, ст. 11 – 1.96. Зеленым прямоугольником выделен временной интервал асинхронных кривых ст. 9 и 8, соответствовавший землетрясению рядом с пос. Листвянка, а темно-желтым – интервал синхронизации циклов станций, сопровождавшийся землетрясениями рядом с пос. Култук.

Fig. 12. Comparison of cycles revealed for stations 9 and 8 (*а*), 9 and 11 (*б*). Delta $(^{234}U/^{238}U)=1000\times((^{234}U/^{238}U)_{measured}-(^{234}U/^{238}U)_{median})$. $(^{234}U/^{238}U)_{median}$=2.51 / 2.335 / 1.96 for stations 9, 8 and 11, respectively. The green rectangular box shows the time interval of asynchronous curves for stations 9 and 8, which correlates with the earthquake that occurred near Listvyanka settlement. The dark-yellow box shows the interval when the cycles of the stations were synchronized and the earthquakes took place near Kultuk settlement.

Фаза *а* характеризовала начало субширотного согласования процессов на станциях 9 и 11 на 79–39 дней раньше первого землетрясения, произошедшего на полигоне 24.04.2013 г. В фазу *б*, на 39–12(?) дней раньше этого землетрясения, в зону субширотной веерной синхронизации включилась станция 8 (т.е. зона синхронизации продвинулась к западу). В фазу *в*, за 12(?) дней до землетрясения, станция 11 потеряла связь со ст. 8 и 9 и одновременно произошла субмеридиональная синхронизация ст. 27 и 40. Время перехода от фазы *б* к фазе *в* точно не зафиксировано из-за неплотного

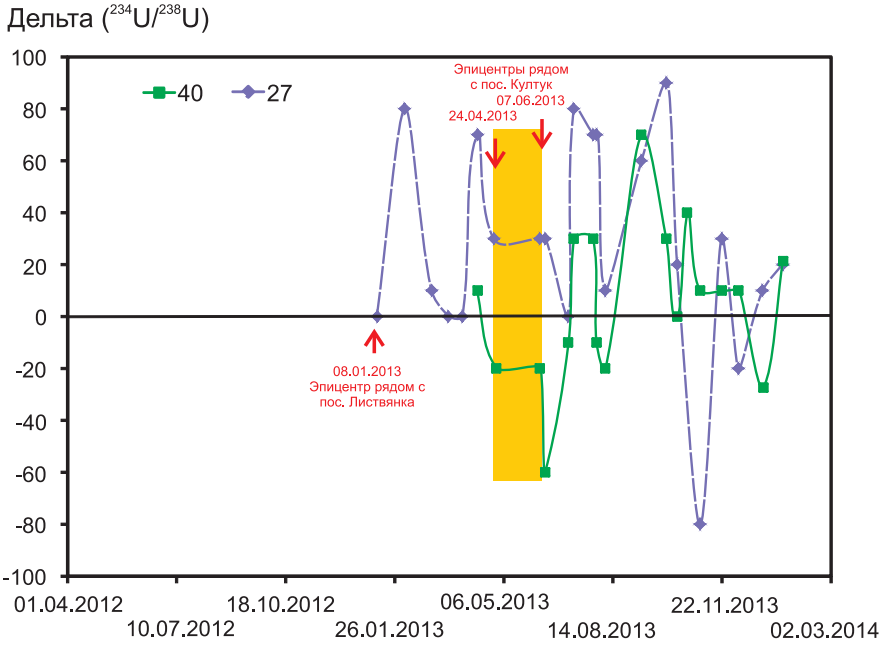


Рис. 13. Сопоставление циклов ст. 40 и 27. Значения дельта ($^{234}U/^{238}U$) для проб рассчитаны относительно медиан: ст. 40 – 2.40, ст. 27 – 3.20. Темно-желтым прямоугольником выделен интервал синхронизации циклов станций, сопровождавшийся землетрясениями рядом с пос. Култук.

Fig. 13. Comparison of cycles at stations 40 and 27. Delta values ($^{234}U/^{238}U$) for the samples are calculated with reference to medians: station 40 – 2.40, and station 27 – 3.20. The dark-yellow box shows the interval when the cycles of the stations were synchronized and the earthquakes took place near Kultuk settlement.

ряда наблюдений. Возможно, этот переход состоялся за 20–25 дней до землетрясения. В фазу *в* выполнялось условие, при котором произошел сейсмический толчок. Затем между первым и вторым землетрясениями наступила фаза *г,* длившаяся 44 дня. После второго землетрясения, произошедшего 07.06.2013 г., система Култукского полигона перешла в хаотическое состояние. Фазы *а*–*в*, таким образом, соответствовали подготовке первого сейсмического толчка, а фаза *г* – реализации и завершению сейсмической активизации.

Мы приходим к выводу о том, что во время землетрясений в апреле и июне 2013 г. часть станций наблюдений была подчинена субширотному деформационному направлению, а другая часть – субмеридиональному. Субширотное направление синхронизации определялось последовательной активизацией Обручевского разлома с востока на запад. Субмеридиональное направление синхронизации могло отражать сопряженные деформации. Это направление соответствует простиранию Зазарского разлома на южном краю Шарыжалгайского выступа (см. рис. 1). Его роль в новейшей структуре не определена. В контексте настоящего исследования сейсмогенной синхронизации станций Култукского полигона можно предположить, что именно Зазарский разлом оказал ограничивающее влияние на западное распространение деформаций Обручевского разлома. Угол между синхронизированными структурными направлениями со стороны оз. Байкал составлял 114°. В сейсмогенных деформациях могли реализоваться касательные напряжения, которые были созданы в результате преобладающего растяжения в Южно-Байкальской впадине в направлении северо-запад – юго-восток.

4.5. Временные вариации концентраций U, их соотношения с сейсмическими событиями и ($^{234}U/^{238}U$)

Проследим теперь временные вариации концентраций U на примере результатов измерений этого параметра в пробах вод ст. 9 (рис. 15). Три начальные пробы, отобранные с 31.07.2012 г. до 19.09.2012 г., показали одинаковую концентрацию U (0.17 мкг/л). В дальнейшем, с 06.10.2012 г. до 16.03.2013 г. (в течение более пяти месяцев), наблюдалось снижение урана от 0.180 до 0.164 мкг/л. Временной интервал с 31.07.2012 г. до 16.03.2013 г. в целом характеризовал фоновые соотношения концентраций U и ($^{234}U/^{238}U$) с несовпадающими между собой экстремальными значениями. В конце этого интервала концентрация 0.17 мкг/л в пробе, отобранной 04.02.2013 г., соответствовала максимуму ($^{234}U/^{238}U$), а концентрация 0.164 мкг/л в пробе, отобранной 16.03.2013 г., – минимуму этого

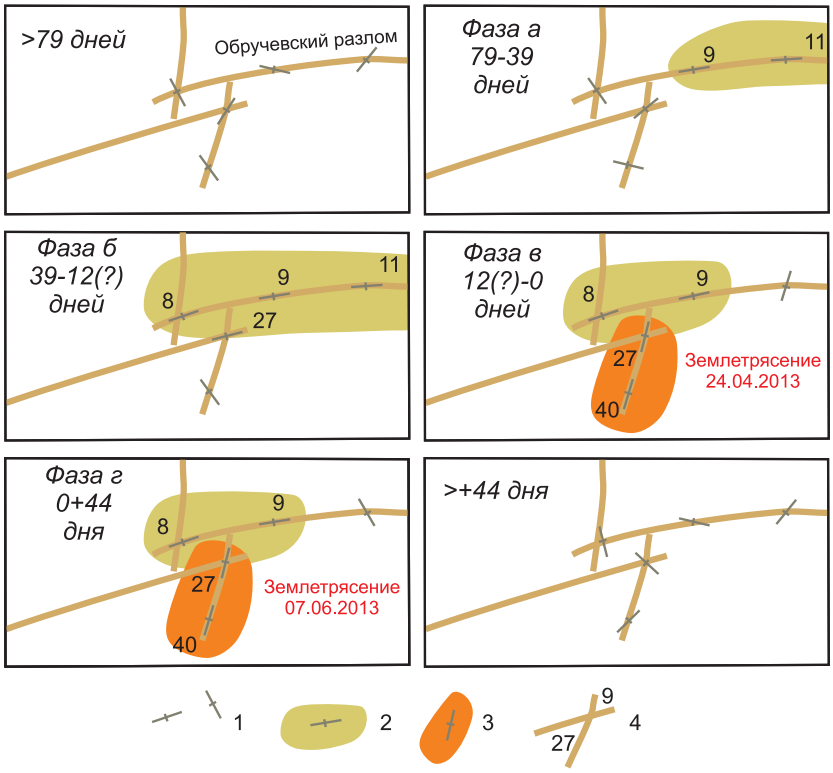


Рис. 14. Схема последовательной субширотной и субмеридиональной азимутальной синхронизации станций на Култукском полигоне.

1 – условные хаотические тензоры станций; *2–3* – тензоры субширотной (*2*) и субмеридиональной (*3*) синхронизации станций; *4* – направления линий опорных станций полигона (см. рис. 6). На фоне общего хаотического состояния системы наблюдений на 79 дней раньше и 44 дня позже первого землетрясения, произошедшего 24.04.2013 г., выделяются временные интервалы ее самоорганизации, обозначающие фазы *а–в* подготовки первого сейсмического толчка с переходом к фазе *г* реализации и завершения сейсмической активизации.

Fig. 14. Scheme of sequential sublatitudinal and submeridional azimuth synchronization of the stations in the Kultuk polygon.

1 – conventional chaotic tensors of stations; *2–3* – tensors of sublatitudinal (*2*) and submeridional (*3*) synchronization of stations; *4* – directions of lines of reference stations in the polygon (see Fig. 6). At the background of the overall chaotic state of the monitoring system, 79 days prior to and 44 after the first earthquake (24 April 2013), self-organization periods can be revealed, which mark phases *а* to *в* in the preparation of the first seismic shock with transition to phase *г* (i.e. the occurrence of the seismic event and completion of the seismic activity).

параметра. Синфазное согласование с вариациями ($^{234}U/^{238}U$) имело место в пределах погрешности измерений концентраций U (рис. 15, *а*).

Через три дня после первого сейсмического события (т.е. 27.04.2013 г.) ст. 9 показала минимум концентрации U (0.16 мкг/л) в противофазе к максимуму ($^{234}U/^{238}U$). В эпизод, соответствующий другому сейсмическому событию (07.06.2013 г.), наметились слабые согласованные вариации ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U. В дальнейшем проявилась тенденция к противофазным соотношениям между этими параметрами при относительных вариациях U, превышающих погрешность измерений с продолжавшимся снижением концентраций до минимума (0.15 мкг/л). Противофазное соотношение U и ($^{234}U/^{238}U$) достигалось на чередующихся минимумах и максимумах последнего параметра.

В водах ст. 8 концентрации U на порядок выше и его временные вариации превышают ошибку измерений в 3–4 раза. Большая часть периода наблюдений ст. 8 характеризуется несовпадающими между собой экстремальными значениями ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U. В 2012–2013 гг. эпизоды совпадения и выхода в противофазу проявлялись на максимумах ($^{234}U/^{238}U$), а во второй половине 2013 г. – на минимумах (рис. 15, *б*). В пробе, отобранной 7 декабря 2013 г., определена аномально высокая концентрация U (6.4 мкг/л). Крупноамплитудная предсейсмогенная структура временных вариаций U рассматривалась в качестве предвестника крупного сейсмического события [*Plastino et al., 2011*].

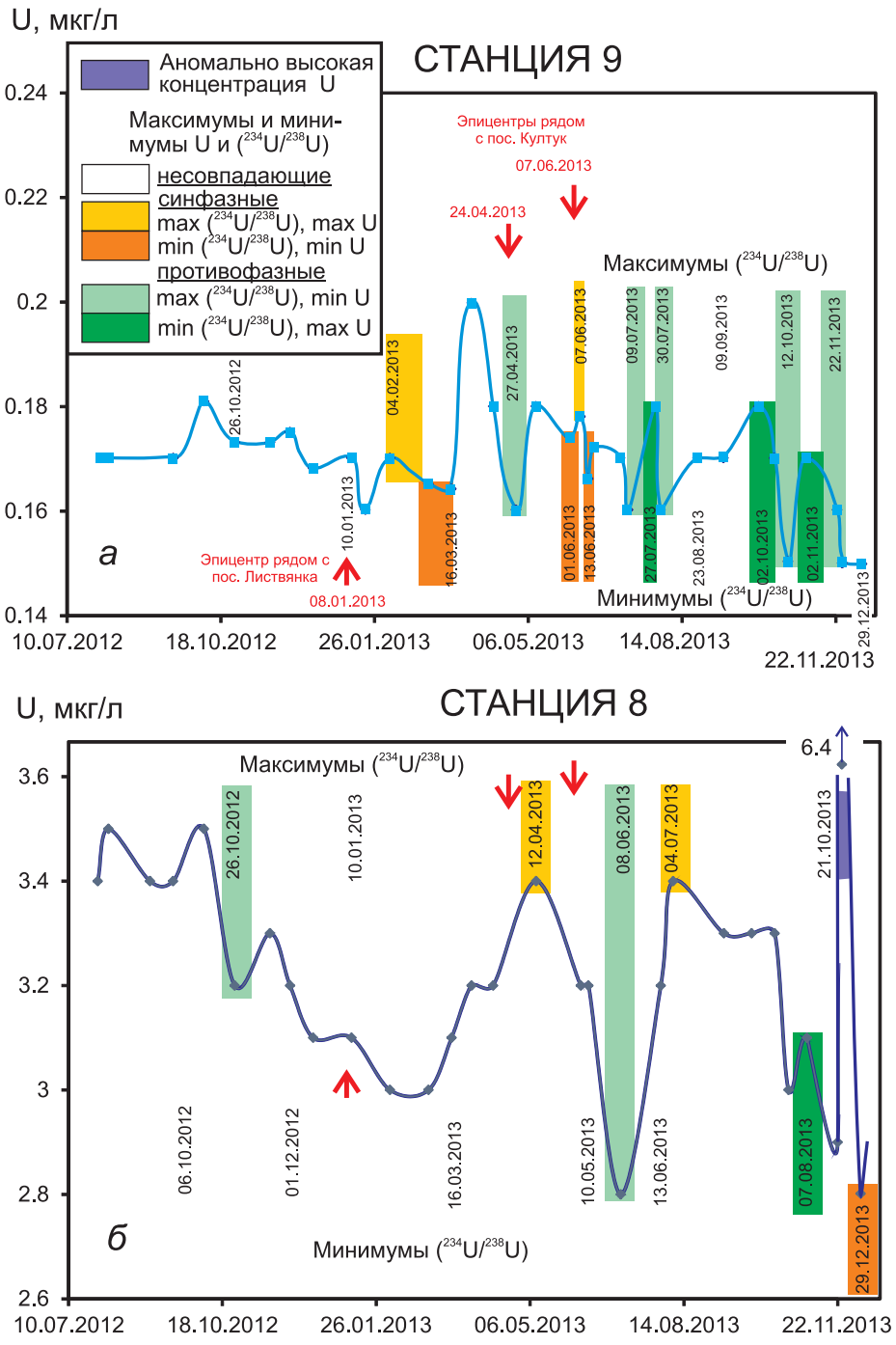


Рис. 15. Временные вариации концентрации U в водах ст. 9 (*а*) и 8 (*б*) и сопоставление экстремальных концентраций U с экстремальными ($^{234}U/^{238}U$).

Даты максимумов и минимумов ($^{234}U/^{238}U$) соответствуют датам на рис. 8 и 9. Концентрации U в водах ст. 9 и 8 различаются между собой на порядок. Типичные ошибки определений U составляют 5 % при его концентрации 1 мкг/л и 10 % при его концентрации 0.1 мкг/л. На диаграмме *б* фиолетовым цветом выделена аномально высокая концентрация U (6.4 мкг/л) в пробе, отобранной 07.12.2013 г. Максимальное ($^{234}U/^{238}U$) было определено 21.10.2013 г. (т.е. до аномального выброса U). После выброса U определен синфазный минимум 29.12.2013 г.

Fig. 15. Temporal variations of the U concentration in water from stations 9 (*a*) and 8 (*б*). Correlation between extremely high concentrations of U and extremely high values of $^{234}U/^{238}U$ ratio.

Dates of maximum and minimum values of ($^{234}U/^{238}U$) correspond to the dates shown in Figs 8 and 9. Concentrations of U in water from stations 9 and 8 differ between each other by an order of magnitude. Typical errors of U measurements amount to 5 % and 10 % for the concentrations of 1 mkg/l and 0.1 mkg/l, respectively. In diagram (*б*), an anomalously high concentration of U (6.4 mkg/lл) is marked in purple (the sample was taken on 07 December 2013). The maximum ($^{234}U/^{238}U$) was determined on 21 October 2013 (i.e. prior to the anomalous release of U). After the U release, an in-phase minimum was obtained on 29 December 2013.

В целом, от начала к концу периода наблюдений на ст. 8 и 9 наблюдалась перестройка системы источников урана. Синхронное повышение ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U, вероятно, отражало избыточное поступление ^{234}U из зоны деформаций и, по крайней мере, частично было связано с подготовкой сейсмических толчков и их реализацией. Небольшие амплитуды этих максимумов обусловлены слабой сейсмической активностью. Увеличение деформаций в активных разломах должно привести к более значительной добавке ^{234}U. Противофазные отношения между ($^{234}U/^{238}U$) и концентрациями U воспринимались по модели двухкомпонентного смешения как следствие мобилизации неравновесного U из зоны деформаций и равновесного – из пород зоны окисления. Если ($^{234}U/^{238}U$) возрастало (т.е. увеличивалась доля компонента неравновесного урана из зоны деформаций), снижалось поступление урана из зоны окисления. И наоборот, если ($^{234}U/^{238}U$) снижалось (т.е. возрастала доля компонента равновесного урана из зоны окисления), максимум концентрации урана отражал его повышенное извлечение из зоны окисления.

Из общего анализа рис. 15 следует вывод о разной динамике поступления урана в воды ст. 9 и 8. Несовпадающие между собой (фоновые) экстремальные значения ($^{234}U/^{238}U$) и концентраций U в начальный период наблюдений на ст. 9 сменились эпизодами повышенной мобильности урана из деформационной зоны, чередовавшимися с эпизодами повышенной мобильности урана из зоны окисления. На ст. 8 в период с 26.10.2012 г. до 04.07.2013 г. эпизодически проявлялись деформационные урановые импульсы, в том числе сочетавшиеся с землетрясениями 9–10-го класса. Начиная с 07.08.2013 г. эти импульсы сменились урановыми импульсами зоны окисления. На этом этапе произошел аномальный выброс урана.

5. Заключение

При разработке Култукского сейсмопрогностического полигона использованы результаты измерений массива данных 170 проб. Сначала выполнены сравнительные исследования ($^{234}U/^{238}U$) в поверхностных и подземных водах. На тектонически стабильных участках, в бассейнах речек Ангасолка, Тигунчиха, Слюдянка, Похабиха и Талая, выявлено преобладание компонентов поверхностного стока с частичным примешиванием приповерхностных грунтовых вод. На участке Вербный бассейна р. Култучная наблюдался тренд смешения компонентов поверхностного стока и деформационной зоны. На участке Медлянка определены три тренда смешения компонентов: 1) деформационной зоны и поверхностного стока, 2) деформационной зоны и окисленных грунтовых вод и 3) деформационной зоны с варьирующейся степенью неравновесия U. На участках без постоянных водотоков выделены тренды смешения компонентов деформационной зоны и близповерхностных грунтовых вод (участок Школьный) и компонентов деформационной зоны с варьирующейся степенью неравновесия U (участок Земляничный).

Состав изотопов U и Sr в подземных водах Култукского полигона отражал взаимодействие вода–порода в шовной зоне Сибирского кратона и охарактеризован моделью смешения двух конечных компонентов: NE (nonequilibrium) сильнонеравновесного U из деформационной зоны ($^{87}Sr/^{86}Sr$= =0.70534, ($^{234}U/^{238}U$)=3.3 ед. активности) и E (equilibrium) равновесного U из зоны окисления ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.7205, ($^{234}U/^{238}U$)=1.0). Выявлено относительное обогащение радиогенным Sr вод Шарыжалгайского блока фундамента Сибирского кратона. Для сейсмопрогностического мониторинга выбраны станции подземных вод с аномально высокими ($^{234}U/^{238}U$) (2.0–3.3 ед. активности) при сравнительно низких $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.705341–0.712927).

В процессе мониторинга, проводившегося с июня 2012 г. до января 2014 г., определен колебательный характер временных вариаций ($^{234}U/^{238}U$) с менявшимися во времени длительностью и амплитудой циклов. Определено ключевое значение азимутальной ориентировки станций, на которых проявлялась синхронизация ($^{234}U/^{238}U$) циклов. Переход к режиму с сейсмическими событиями 9–10-го класса отразился в общей смене вариаций этого параметра, зафиксированной на западном окончании зоны Обручевского разлома при совмещении минимумов ($^{234}U/^{238}U$) в циклах 55–100 дней вод субширотных станций. При завершении косейсмичного режима произошло совмещение минимумов ($^{234}U/^{238}U$) циклов 13–55 дней вод субширотных и субмеридиональных станций. Во временном интервале с 10.01.2013 г. до 29.03.2013 г. наблюдался веерный характер синхронизации циклов станций в субширотном азимутальном секторе от 272° (ст. 9 и 11) до 73° (ст. 27 и 9). Затем станции краевых частей веера утратили синхронность. Синфазная согласованность вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах станций центральной части веера (ст. 8 и 9) во временном интервале 29.03. – 09.07.2013 г. сопровождалась проявлением синхронности вариаций ($^{234}U/^{238}U$) в водах станций поперечного направления по аз. 14° (ст. 40 и 27).

Из анализа соотношений землетрясений с циклическими вариациями ($^{234}U/^{238}U$) в водах станций Култукского полигона следует, что сейсмический прогноз нового события возможен с предупреждением о первом толчке более чем за месяц. Начало

перехода к предсейсмогенному состоянию выражается в совмещении минимумов циклов ($^{234}U/^{238}U$) в водах всех (или почти всех) станций полигона. В дальнейшем ст. 8 и 9, 40 и 27 синхронизируются между собой, на ст. 8, 9, 11 снижаются амплитуды циклов, на ст. 11 устанавливается постоянный уровень ($^{234}U/^{238}U$) около 1.95, а к моменту сейсмического события значения ($^{234}U/^{238}U$) на ст. 9 выходят на максимум.

Перечисленный прогностический комплекс признаков характеризует основной сценарий активизации западного окончания Обручевского разлома при тригерной активизации от его центральной части. Такой сценарий будет уточняться и детализироваться при дальнейших наблюдениях на полигоне. Другие возможные сценарии сейсмогенных деформаций на Култукском полигоне пока не исследовались. Юго-юго-восточное окончание Главного Саянского разлома в настоящее время не активно.

6. Литература / References

Belichenko V.G., Reznitsky L.Z. Makrygina V.A. Barash I.G., 2006. Terranes of the Baikal–Khubsugul fragment of the Central Asian mobile belt of Paleozoides. State of a problem. In: Geodynamic evolution of the lithosphere in the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). Issue 4, vol. 1. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 37–40 (in Russian) [*Беличенко В.Г., Резницкий Л.З., Макрыгина В.А., Бараш И.Г.* Террейны Байкал–Хубсугульского фрагмента Центрально-Азиатского подвижного пояса палеозоид. Состояние проблемы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 4. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2006. Т. 1. С. 37–40].

Chabaux F., Bourdon B., Riotte J., 2008. U-series geochemistry in weathering profiles, river waters and lakes. In: S. Krishnaswami, J. Kirk Cochran (Eds.), U-Th Series Nuclides in Aquatic Systems. Radioactivity in the Environment, vol. 13, p. 49–104. http://dx.doi.org/10.1016/S1569-4860(07)00003-4.

Chabaux F., Granet M., Larquer Ph., Riotte J., Skliarov E.V., Skliarova O., Alexeieva L., Risacher F., 2011. Geochemical and isotopic (Sr, U) variations of lake waters in the Ol'khon region, Siberia, Russia: Origin and paleoenvironmental implications. *Comptes Rendus Geoscience* 343 (7), 462–470. http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2011.07.004.

Chalov P.I., 1975. Isotopic Fractionation of Natural Uranium. Ilim, Frunze, 236 p. (in Russian) [*Чалов П.И.* Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.].

Chalov P.I., Kiselev G.P., Tikhonov A.I., Vasiliev I.A., Svetlichnaya N.A., 1990. On the spatial correlation of anomalous excess ^{234}U in groundwater and mercury mineralization of telethermal type. *Doklady AN SSSR* 312 (3), 580–583. (in Russian) [*Чалов П.И., Киселев Г.П., Тихонов А.И., Васильев И.А., Светличная Н.А.* О пространственной корреляции аномального избытка ^{234}U в подземных водах и ртутно-сурмяного оруденения телетермального типа // *Доклады АН СССР*. 1990. Т. 312. № 3. С. 580–583].

Chalov P.I., Tuzova T.V., Alekhina V.M., 1980. Isotopic parameters of water from faults of the Earth's crust in a seismically active zone. Ilim, Frunze, 105 p. (in Russian) [*Чалов П.И., Тузова Т.В., Алехина В.М.* Изотопные параметры вод разломов земной коры в сейсмически активной зоне. Фрунзе: Илим, 1980. 105 с.].

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Y.A., 2007. A method for determination of the isotopic composition of authigenic uranium in Baikal bottom sediments. *Russian Geology and Geophysics* 48 (6), 468–477. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.008.

Chebykin E.P., Rasskasov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., 2015. First results of $^{234}U/^{238}U$ monitoring in water from active faults on the western coast of South Baikal. *Doklady Earth Sciences* 460 (2), 142–145. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X15020075.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Mikheev E.A., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminskiy A.K., Snopkov C.V., 2013. Monitoring U and $^{234}U/^{238}U$ in the waters of active faults in the western circuit of the South Baikal basin of the Baikal Rift Zone. In: Continental rifting, associated processes. Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, p. 168–173 (in Russian) [*Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Михеева Е.А., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В.* Мониторинг U и $^{234}U/^{238}U$ в водах активных разломов на западном замыкании Южно-Байкальской впадины Байкальской рифтовой зоны // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. С. 168–173].

Cherdyntsev V.V., 1969. Uranium-234. Atomizdat Press, Moscow, 308 p. (in Russian) [*Чердынцев В.В.* Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.].

Cherdyntsev V.V., 1973. Nuclear Volcanology. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [*Чердынцев В.В.* Ядерная вулканология. М.: Наука, 1973. 208 с.].

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., 1999. Paleoseismodislocations and related paleoearthquakes along the Major Sayan fault zone. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 40 (6), 936–947.

Cizdziel J., Farmer D., Hodge V., Lindley K., Stetzenbach K., 2005. $^{234}U/^{238}U$ isotope ratios in groundwater from Southern Nevada: a comparison of alpha counting and magnetic sector ICP-MS. *Science of The Total Environment* 350 (1–3), 248–260. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.014.

DePaolo D.J., Wasserburg G.J., 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophysical Research Letters* 3 (5), 249–252. http://dx.doi.org/10.1029/GL003i005p00249.

Dobrynina A.A., Sankov V.A., 2008 Destination ripping in earthquake hypocenters as an indicator of a propagating destructive process (Baikal rift system). In: Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). Issue 6, vol. 1. Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, p. 110–112 (in Russian) [*Добрынина А.А., Саньков В.А.* Направления вспарывания в очагах землетрясений как показатель распространения деструктивного процесса (на примере Байкальской рифтовой системы) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского пояса (от океана к континенту). Вып. 6. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. Т. 1. С. 110–112].

Edgington D.N., Robbins J.A., Colman S.M., Orlandini K.A., Gustin M.-P., 1996. Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal. *Earth and Planetary Science Letters* 142 (1), 29–42. http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(96)00085-4.

Faure G., 1989. Principles of Isotope Geology. Wiley, New York, 589 p.

Faure G., 2001. Origin of Igneous Rocks: the Isotopic Evidence. Springer Verlag, Berlin, 496 p.

Finkel R.C., 1981. Uranium concentrations and $^{234}U/^{238}U$ activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors. *Geophysical Research Letters* 8 (5), 453–456. http://dx.doi.org/10.1029/GL008i005p00453.

Halicz L., Segal I., Gavrieli I., Lorber A., Karpas Z., 2000. Determination of the $^{234}U/^{238}U$ ratio in water samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 422 (2), 203–208. http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670(00)01071-0.

Lamakin V.V., 1968. Neotectonics of the Baikal basin. Nauka, Moscow, 247 p. (Transactions of Geological Institute, vol. 187) (in Russian) [*Ламакин В.В.* Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с. (Труды Геологического института, вып. 187)].

Logatchev N.A., Zorin Yu.A., 1992. Baikal rift zone: structure and geodynamics. *Tectonophysics* 208 (1–3), 273–286. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90349-B.

Maher K., DePaolo D.J., Christensen J.N., 2006. U–Sr isotopic speedometer: Fluid flow and chemical weathering rates in aquifers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (17), 4417–4435. http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1559.

Map of the last ten earthquakes epicenters, 2013. The Baikal Branch of the Geophysical Survey, Irkutsk. Available from: http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1 (in Russian) [*Карта эпицентров последних десяти землетрясений*. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2013. http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1].

Melnikov A.I., 2011. Structural Evolution of Metamorphic Complexes of Ancient Shields. Academic Publishing House "Geo", Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [*Мельников А.И.* Структурная эволюция метаморфических комплексов древних щитов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 288 с.].

Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Aref'ev S.S., Bykova V.V., Masal'skii O.K., 2012. The 2008 Kultuk earthquake with M_w=6.3 in the south of Baikal: Spatial-temporal analysis of seismic activation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (7–8), 594–614. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351312060031.

Paces J.B., Ludwig K.R., Peterman Z.E., Neymark L.A., 2002. $^{234}U/^{238}U$ evidence for local recharge and patterns of groundwater flow in the vicinity of Yucca Mountain, Nevada, USA. *Applied Geochemistry* 17 (6), 751–779. http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00037-9.

Pin C., Bassin C., 1992. Evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic method for isotopic analysis in geological materials. *Analytica Chimica Acta* 269 (2), 249–255. http://dx.doi.org/10.1016/0003-2670(92)85409-Y.

Plastino W., Panza G.F., Doglioni C., Frezzotti M.L., Peccerillo A., De Felice P., Bella F., Povinec P.P., Nisi S., Ioannucci L., Aprili P., Balata M., Cozzella M.L., Laubenstein M., 2011. Uranium groundwater anomalies and active normal faulting. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 288 (1), 101–107. http://dx.doi.org/10.1007/s10967-010-0876-y.

Radziminovitch N.A., Melnikova V.I., San'kov V.A., Levi K.G., 2006. Seismicity and seismotectonic deformations of the crust in the Southern Baikal basin. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (11), 904–920. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306110048.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Mikheeva E.A., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminskiy A.K., Demberel C., 2013a. Perspectives of monitoring uranium and $^{234}U/^{238}U$ in the waters of the active faults of the central part of the Baikal rift zone and the adjacent territory of Mongolia. In: Physical principles of prediction of rock failure: Abstracts of the IX International school-seminar. Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, p. 71. (in Russian) [*Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Михеева Е.А., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Дэмбэрэл С.* Перспективы мониторинга урана и $^{234}U/^{238}U$ в водах активных разломов центральной части Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории Монголии // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Тезисы докладов IX Международной школы–семинара. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. С. 71].

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V., 2012. Potassic and potassic–sodic volcanic series in the Cenozoic of Asia. Academic publishing house "Geo", Novosibirsk, 351 p. (in Russian) [*Рассказов С.В.,*

Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 351 с.].

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Mikheeva E.A., Snopkov S.V., 2013b. The Kultuk volcano: spatial–temporal change of magmatic sources at the western terminus of the South Baikal basin between 18 and 12 Ma. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (2), 135–168 (in Russian) [*Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Михеева Е.А., Снопков С.В.* Култукский вулкан: пространственно-временная смена магматических источников на западном окончании Южно-Байкальской впадины в интервале 18–12 млн лет назад // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 2. С. 135–168]. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0095.

Riotte J., Chabaux F., 1999. ($^{234}U/^{238}U$) activity ratios in freshwaters as tracers of hydrological processes: the Strengbach watershed (Vosges, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (9), 1263–1275. http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00009-5.

San'kov V.A., Chipizubov A.V., Lukhnev A.V., Smekalin O.P., Miroshnichenko A.I., Calais E., Déverchère J., 2004. Assessment of a large earthquake risk in the zone of Main Sayan fault using GPS geodesy and paleoseismology. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 45 (11), 1369–1376.

Shen C.-C., Lawrence Edwards R.L., Cheng H., Dorale J.A., Thomas R.B., Moran S.B., Weinstein S.E., Edmonds H.N., 2002. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemical Geology* 185 (3–4), 165–178. http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00404-1.

Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., Sankov V.A., Dneprovsky Y.I., Rasskazov S.V., 1984. Geology and Seismicity of the BAM Zone. Neotectonics. Nauka, Novosibirsk, 207 p. (in Russian) [*Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В.* Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 207 с.].

Sobolev G.A., Lyubushin A.A. (Jr.), Zakrzhevskaya N.A., 2005. Synchronization of microseismic variations within a minute range of periods. *Izvestiia, Physics of the Solid Earth* 41 (8), 599–621.

Solonenko V.P., Nikolaev V.V., Semenov R.M., Demyanovich M.G., Kurushin R.A., Khromovskih V.S., Chipizubov A.V., 1985. Geology and Seismicity of the BAM Zone. Seismology and Seismic Zoning. Nauka, Novosibirsk, 207 p. (in Russian) [*Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромовских В.С., Чипизубов А.В.* Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. Новосибирск: Наука, 1985. 207 с.].

Suvorov V.D., Mishen'kina Z.R., 2005. Structure of sedimentary cover and basement beneath the South basin of Lake Baikal inferred from seismic profiling. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 46 (11), 1141–1149.

Timofeev V.Yu., Kalish Ye.N., Stus' Yu.F., Ardyukov D.G., Arnautov G.P., Smirnov M.G., Timofeev A.V., Nosov D.A., Sizikov I.S., Boiko E.V., Gribanova E.I., 2013. Gravity variations and recent geodynamics of the south-western part of Baikal region. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (2), 119–134 (in Russian) [*Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Арнаутов Г.П., Смирнов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Грибанова Е.И.* Вариации силы тяжести и современная геодинамика юго-западной части Байкальского региона // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 2. С. 135–168]. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0094.

Рассказов Сергей Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, зав. лабораторией
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия
Тел. (3952)511659; ✉ e-mail: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov, Sergey V., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of Laboratory
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Irkutsk State University, Geological Faculty
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia
Tel. +7(3952)511659; ✉ e-mail: rassk@crust.irk.ru

Чебыкин Евгений Павлович, канд. хим. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Лимнологический институт СО РАН
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия
e-mail: cheb@lin.irk.ru

Chebykin, Eugene P., Candidate of Chemistry, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Limnological Institute, Siberian Branch of RAS
3 Ulan-Batorskaya street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: cheb@lin.irk.ru

Ильясова Айгуль Маратовна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: ila@crust.irk.ru

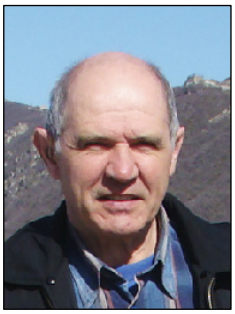
Ilyasova, Aigul M., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: ila@crust.irk.ru

Воднева Елена Николаевна, аспирант
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Лимнологический институт СО РАН
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия
e-mail: ven@lin.irk.ru

Vodneva, Elena N., postgraduate student
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Limnological Institute, Siberian Branch of RAS
3 Ulan-Batorskaya street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: ven@lin.irk.ru

Чувашова Ирина Сергеевна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия
Тел. +7(3952)511659; e-mail: chuvashova@crust.irk.ru

Chuvashova, Irina S., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Irkutsk State University, Geological Faculty
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia
Tel. +7(3952)511659; e-mail: chuvashova@crust.irk.ru



Борняков Сергей Александрович, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия
e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Bornyakov, Sergei A., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Irkutsk State University, Geological Faculty
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia
e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Семинский Александр Константинович, аспирант
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Seminskiy Alexander Konstantinovich, postgraduate student
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

Снопков Сергей Викторович, канд. геол.-мин. наук, доцент кафедры геологии и геофизики
Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

Snopkov, Sergei V., Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor
Irkutsk State University, Geological Faculty, Geology and Geophysics Chair
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia

Чечельницкий Владимир Васильевич, канд. геол.-мин. наук, зам. директора по научной работе
Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
Тел.: (3952)427490; e-mail: chechel@crust.irk.ru

Chechelnitsky, Vladimir V., Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Director for Science
Baikal Division of Geophysical Survey, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)427490; e-mail: chechel@crust.irk.ru

Гилёва Надежда Алексеевна, главный геофизик
Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
Тел.: (3952)511231; e-mail: nagileva@crust.irk.ru

Gilyova, Nadezhda A., Chief Geophysicist
Baikal Division of Geophysical Survey, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)511231; e-mail: nagileva@crust.irk.ru