



## ROLE OF THE STRUCTURAL FACTOR IN THE DISTRIBUTION OF HIGH-RADON GROUNDWATER IN THE SOUTHWESTERN FLANK OF THE SOUTH BAIKAL RIFT BASIN

K. Zh. Seminsky<sup>1,2</sup>, Yu. P. Burzunova<sup>1</sup>, A. K. Seminsky<sup>1</sup>, A. A. Bobrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract:** This article discusses the distribution patterns of high-radon groundwater at the southwestern shore of Lake Baikal. This region is a flank of the South Baikal rift basin, characterized by high geodynamic activity and complex fault patterns, without any special geochemical conditions with regard to the content of uranium in the rocks. Based on our observations and measurements, we consolidated the first massive database on radon volume activity (Q) in a variety of local water sources. In the Kultuk-Vydrino area, the Q values vary from zero to 81.1 Bq/l, according to the analysis of the water samples from 93 springs, lakes, small streams, wells, and drilled holes. The highest concentrations of radon are discovered in the groundwater samples. Such values are unevenly scattered across the study area. The chain of the maximum Q values trends northwestwards along the Lake Baikal shore. This distribution pattern of radon, as well as the locations of individual water sources with Q>15 Bq/l are predetermined by the structural factor. The paragenetic analysis of faults and joints in the Kultuk-Vydrino area shows that this factor includes both the structure and stages in the development of the regional largest Main Sayan fault zone (the southwestern flank of the South Baikal basin is a segment of this zone). The water sources with increased concentrations of radon are located in zones with a high density of the 2<sup>nd</sup> order faults, especially on sites wherein the NW-striking faults cross the transverse faults that have experienced repeated activation. Temperature T is an additional factor influencing the degree of radioactivity in water. A relationship between T and Q is reverse. Water sources with Q>15 Bq/l associated with the 2<sup>nd</sup> order fault zones may occur also due to a locally lower temperature of groundwater. Our study gives evidence that the southwestern coast of Lake Baikal is promising for finding high-radon water sources. Using such water in balneology can become a valuable contribution to the tourism and recreational potential of the region. This prospect is especially important for the town of Baikalsk that is now developing without its township-forming enterprise: the notorious pulp-and-paper mill has been completely shut down.

**Key words:** fault zone; radon; groundwater

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by K.G. Levi

Received: March 30, 2017

Revised: May 1, 2017

Accepted: June 13, 2017

**For citation:** Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., Seminsky A.K., Bobrov A.A., 2017. Role of the structural factor in the distribution of high-radon groundwater in the southwestern flank of the South Baikal rift basin. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 949–969. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0326.

**Для цитирования:** Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Семинский А.К., Бобров А.А. Роль структурного фактора в распределении подземных вод с повышенным содержанием радона на юго-западном фланге Южно-Байкальской рифтовой впадины // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 949–969. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0326.

## РОЛЬ СТРУКТУРНОГО ФАКТОРА В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ РАДОНА НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ФЛАНГЕ ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ВПАДИНЫ

К. Ж. Семинский<sup>1,2</sup>, Ю. П. Бурзунова<sup>1</sup>, А. К. Семинский<sup>1</sup>, А. А. Бобров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

**Аннотация:** В статье рассмотрены закономерности распространения подземных вод с повышенной концентрацией радона на примере региона, который при типовой геохимической обстановке по содержанию в породах урана отличается высокой геодинамической активностью и, как следствие, сложным разломным строением. Впервые для юго-западного фланга Южно-Байкальской рифтовой впадины проведено массовое исследование объемной активности радона (Q) в разнотипных водопроявлениях. Опробование 93 родников, скважин, колодцев, озер и мелких ручьев юго-западного побережья оз. Байкал показало, что величина Q на участке Култук – Выдрино варьируется от 0 до 81.1 Бк/л. Наибольшие концентрации характерны для подземных вод и распределены в пределах участка исследований неравномерно. Цепочка максимумов параметра Q имеет северо-западное простираие и протягивается вдоль берега оз. Байкал. Главную роль в подобном распределении, а также в локализации отдельных водопроявлений с Q>15 Бк/л играет структурный фактор. Согласно данным парагенетического анализа разломной и трещинной сети на участке Култук – Выдрино, он определяется строением и этапностью формирования крупнейшей в регионе зоны Главного Саянского разлома, отрезок которой представляет юго-западный фланг Южно-Байкальской котловины. Водопроявления с повышенным содержанием радона располагаются на участках с высокой плотностью разломов 2-го порядка и тяготеют к узлам пересечения северо-западных нарушений с поперечными разрывами, испытывшими многократную активизацию. Дополнительным фактором, влияющим на степень радиоактивности вод, является их температура, которая характеризуется обратной связью с параметром Q. Как следствие, появление в зонах разломов 2-го порядка водопунктов с Q>15 Бк/л, кроме наличия разломных узлов, может быть связано с локальным понижением температуры подземных вод. Результаты проведенных исследований свидетельствуют об определенных перспективах региона в плане поиска вод с повышенным содержанием радона, пригодных для использования в бальнеологии. Это может способствовать увеличению туристско-рекреационного потенциала юго-западного побережья оз. Байкал, что особенно актуально для развития г. Байкальска, где недавно было закрыто градообразующее предприятие – целлюлозно-бумажный комбинат.

**Ключевые слова:** разломная зона; радон; подземные воды

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Прикладное значение исследований содержания радона в подземных водах обуславливается, с одной стороны, необходимостью оценки предельно допустимых концентраций радиоактивного газа в питьевой воде, а с другой – поиском вод с повышенной радиоактивностью, пригодных для использования в бальнеологии. Кроме того, результаты опробования водопроявлений на содержание радона активно применяются в регионах, перспективных для выявления участков локализации урановых руд, а в сейсмоактивных зонах – для выявления предвестников сильных землетрясений.

Эффективность решения перечисленных прикладных задач, как и фундаментальных вопросов гидрогеохимии радоновых вод, в существенной степени определяется достоверными сведениями о соотношениях вкладов факторов формирования

эманационного поля в конкретном регионе. Главными из них являются содержание урана в горных породах (вещественный фактор), их нарушенность разломами (структурный фактор), степень современной активности недр (геодинамический фактор), атмосферная динамика (планетарный фактор), а также типы и свойства подземных вод (гидрогеологический фактор).

По большому счету уровень объемной активности радона (Q) определяется вещественным и структурным факторами, тогда как остальные факторы приводят к периодическим или эпизодическим вариациям концентрации радиоактивного газа по отношению к общему тренду. Вещественный фактор является главным на участках земной коры с аномальным содержанием урана и приводит к формированию радоновых вод, у которых объемная активность радона превышает 185 Бк/л. Так как области их распространения ограничены, в

большинстве регионов повышенный уровень радиоактивного газа в воде связан с влиянием структурного фактора.

Анализ работ предшественников [Steinitz et al., 1992; Guerra, Etioppe, 1999; Agarwal et al., 2006; Malakootian et al., 2014; Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016] показывает, что радиоактивность подземных вод, приуроченных к разломам, отличается пространственной изменчивостью. В одних водопроявлениях она может в несколько раз превышать фон, а в других – почти не отличаться от величин, свойственных региону в целом. В рамках воздействия структурного фактора это может быть связано с неоднородным строением разломной зоны в продольном и поперечном направлениях, отличающимся у дизъюнктивов разного морфогенетического типа [Seminsky, 2003, 2012]. Наиболее общими закономерностями в данном случае являются чередование вдоль простирания разломной зоны участков с повышенной и пониженной нарушенностью породного массива, а также наличие поперечной зональности с приосевой подзоной магистрального сместителя и периферийными подзонами проявления разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости – в крыльях.

Целью проведенного исследования было установить закономерности распространения подземных вод с повышенной концентрацией радона в регионе, который при типовой геохимической обстановке по содержанию в породах урана отличается высокой геодинамической активностью и, как следствие, сложным разломным строением.

В качестве такого региона для исследований было выбрано побережье оз. Байкал на отрезке Култук – Выдрино (рис. 1, А), относящееся к юго-западному флангу Южно-Байкальской котловины. Это наиболее древняя из цепочки впадин Байкальской рифтовой зоны, которая отличается высокой современной активностью, проявляющейся, в частности, в виде множества слабых и отдельных достаточно сильных сейсмических событий [Logachev, Florensov, 1977; Levi et al., 1997; Melnikova, Radziminovich, 1998; Logachev, 2003; Sherman et al., 2004; Seminsky, 2009; Radziminovich, 2010]. Последнее из них произошло в 2008 г. под акваторией оз. Байкал в 6.5 км к северу от устья р. Утулик и одноименного поселка ( $M=6.3$ ) [Baikal Branch..., 2017], где оно ощущалось с интенсивностью 7–8 баллов.

В соответствии с гидрогеологическим районированием [Lomonosov et al., 1977] район исследований относится к Байкальской гидроминеральной провинции азотных и метановых терм, для которой не характерны истинно радоновые воды [Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016]. Как следствие, повышенное вплоть до классификационного уровня в 185 Бк/л содержание радона в подземных водах

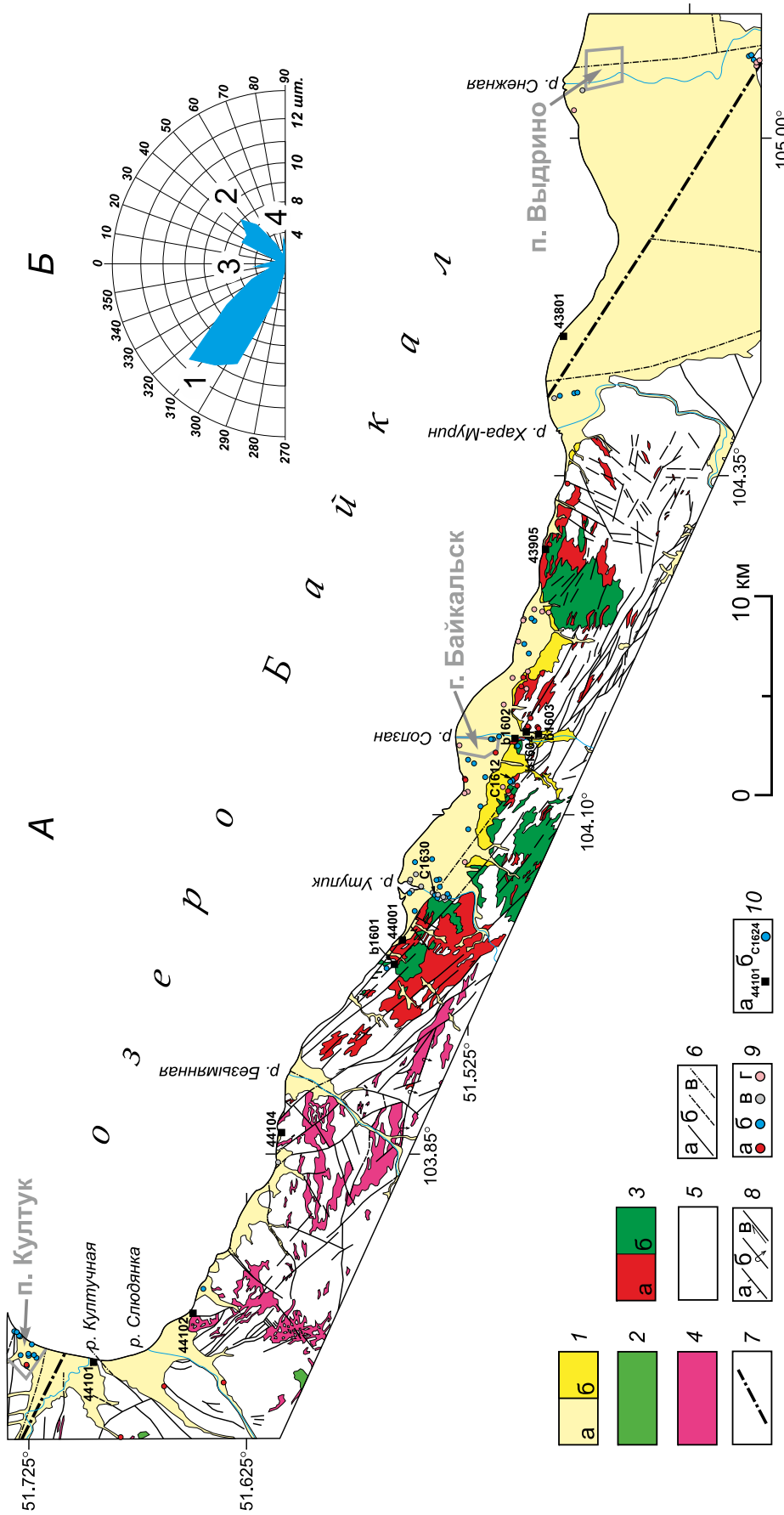
для большинства геологических обстановок должно в существенной степени определяться структурным фактором. Для побережья оз. Байкал на отрезке Култук – Выдрино данный тезис требует подтверждения, так как если судить по опубликованным материалам [Vlasov et al., 1962; Myasnikov et al., 2009], эта территория в плане радиоактивности подземных вод детально не изучалась. Кроме научных целей, подобное исследование в настоящее время имеет повышенную значимость в практическом отношении. Выявление в окрестностях Байкальска, где недавно было закрыто градообразующее предприятие (целлюлозно-бумажный комбинат), вод с повышенным содержанием радона позволит перепрофилировать регион за счет создания курортно-санаторной зоны, подобной уже имеющейся в Тункинской долине (например, курорт Нилова Пустынь с  $15 < Q < 100$  Бк/л).

Главные задачи исследования: 1) провести в пределах юго-западного побережья оз. Байкал опробование водопроявлений на содержание радона, выявить уровни радиоактивности подземных вод и закономерности их пространственного распределения; 2) провести линеаментный анализ рельефа, геолого-структурные исследования и на основе комплексного анализа полученных материалов установить основные закономерности разломообразования в пределах юго-западного фланга Южно-Байкальской рифтовой впадины; 3) установить для изученного региона роль разломов в распределении подземных вод с повышенным содержанием радона на базе сопоставления результатов радонометрических и геолого-структурных исследований.

## 2. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ И ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Фактический материал, использованный для решения поставленных задач, представлен на рис. 1, А, и состоит из двух частей. Первую образовали оценки параметра  $Q$  в разнотипных водопунктах изучаемого участка, который протягивается в виде полосы шириной 5–10 км вдоль берега оз. Байкал на отрезке Култук – Выдрино. Вторую часть составили материалы линеаментного анализа рельефа и геолого-структурные наблюдения в серии выходов горных пород, для девяти из которых был проведен массовый замер элементов залегания трещин.

Измерения объемной активности радона в пробах воды ( $Q$ , Бк/л) проводились по стандартной методике [CAMERA-01..., 2003] при помощи радиометра «Камера-01», чувствительность которого составляет  $0.27 \pm 0.03$  Бк $^{-1}$ с $^{-1}$ , а пределы допускаемой



**Рис. 1.** Разломная структура и положение пунктов исследования на юго-западном побережье оз. Байкал.

*A* – положение пунктов опробования водопровялений и точек с массовыми замерами трещин на схеме основных элементов геологического строения, представленных в соответствии с Государственной геологической картой м-ба 1:50000 для участка Култук – Выдрино. *Б* – роза-диаграмма для участка Култук – Выдрино. *В* – роза-диаграмма простираения разломов, представленных на схеме *A*. *1* – четвертичные (а) и неогеновые (б) рыхлые отложения; *2* – покровы неогеновых базальтов; *3* – палеозойские интрузивы: граниты (а), гранодиориты, диориты и габбро (б); *4* – протерозойские граниты и гранит-пегматиты; *5* – разнотипные метаморфические породы; *6* – разломы: достоверные (а), предполагаемые (б), скрытые под рыхлыми отложениями (в); *7* – крупные докембрийские разломы, скрытые под рыхлыми отложениями; *8* – разломы с указанием морфологического типа: сбросы (а), взбросы (б), сдвиги (в); *9* – разнотипные водопровяления: родники (а), скважины (б), колодцы (в), естественные и искусственные озера (г); *10* – пункты исследования трещинных сетей (а) и разнотипных водопровялений (б).

**Fig. 1.** Fault structure, and locations of the monitoring sites on the southwestern coast of Lake Baikal.

*A* – locations of water sampling and mass fracture measurement points in the scheme showing the main elements of the geological structure of the Kultuk – Vydrino area (according to the State Geological Map, scale 1:50000). *B* – rose diagram showing the strike of faults (see scheme *A*). *1* – Quaternary (a) and Neogenic (b) loose sediments; *2* – Neogenic basalt nappe; *3* – Paleozoic intrusions: granite (a), granodiorite, diorite and gabbro (b); *4* – Proterozoic granite and granite pegmatite; *5* – metamorphic rocks of various types; *6* – faults: confirmed (a), assumed (b), under loose sediments (v); *7* – large Precambrian faults under loose sediments; *8* – faults: normal (a), reverse (b), strike-slip (v); *9* – water sources: springs (a), drilled holes (b), wells (v), natural and man-made lakes (g); *10* – sites for monitoring of joint systems (a) and water sources (b).



относительной погрешности не превышают  $\pm 30\%$ . Измерения осуществлялись в 93 водопунктах, 20 из которых принадлежали к поверхностным (озера, ручьи), а 73 – к подземным (родники, скважины, колодцы) водам. В 11 пунктах опробование проводилось несколько раз в год, чтобы оценить пределы сезонной изменчивости параметра  $Q$  в водисточниках с высокой и низкой средней радиоактивностью. Общее количество измерений составило 124 оценки объемной активности радона, не считая определений методического характера. Кроме измерений параметра  $Q$ , для большинства водопроявлений определялась температура воды (с точностью до 10-х долей градуса), глубина отбора пробы, некоторые другие количественные и качественные характеристики. Наиболее плотные сети пунктов опробования были созданы там, где по косвенным признакам следует ожидать наибольшую активность перемещений по разломам. Это п. Култук, располагающийся в узле пересечения главных рифтообразующих разломов (Обручевский и Главный Саянский), и участок Утулик – Хара-Мурин, находящийся в непосредственной близости от эпицентра последнего достаточно сильного землетрясения в регионе (Култукское, 27.08.2008 г.;  $M=6.3$ ).

Исследования закономерностей разрывообразования в пределах изучаемого участка базировались на анализе разломной сети, представленной на Государственной геологической карте м-ба 1:50000 (рис. 1, А), линеаментном анализе рельефа (рис. 2, Б) и парагенетическом анализе диаграмм трещиноватости в отдельных точках наблюдения (рис. 3). Разломы, откартированные при геологической съемке (см. рис. 1, А), как правило, представляют древние дизъюнктивы, проявленные в горных породах различными типами тектонитов. Спряmlенные элементы рельефа – линеаменты, – выделенные при анализе его трехмерной модели (см. рис. 2, Б), в большинстве своем для изучаемого геодинамически активного региона представляют новейшие разломы. Они зачастую совпадают с отрезками древних дизъюнктивов и являются наиболее важными в контексте проведенного исследования, так как в благоприятной динамической обстановке могут быть проницаемыми для подземных вод. Характер этой обстановки определялся посредством парагенетического анализа разломной сети, а также трещинных сетей, задокументированных вблизи нескольких разломов – представителей главных дизъюнктивных систем на участке исследований.

Метод интерпретации круговых диаграмм детально представлен в серии специальных публикаций [Seminsky, 2003, 2014, 2015] и, в частности, позволяет определить тип разломной зоны (и, соот-

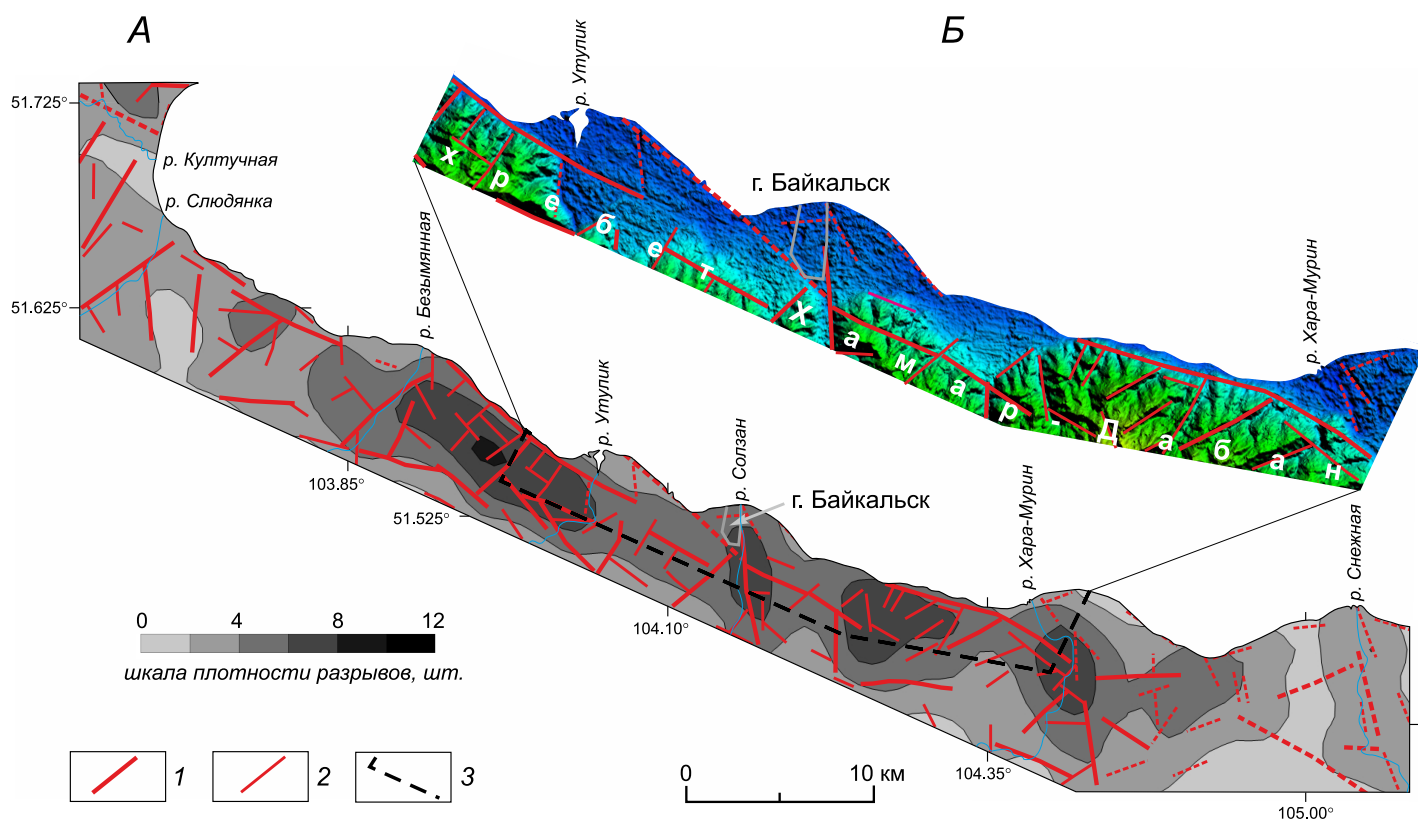
ветственно, динамическую обстановку ее формирования), в которой образовалась задокументированная при массовых измерениях трещиноватость, не имеющая, как правило, видимых признаков смещений. Решение основывается на совпадении максимумов анализируемой сети с эталонным парагенезисом, представляющим набор систем трещин, формирующийся в зоне влияния правого сдвига, левого сдвига, взброса, надвига или сброса. На примере рис. 3 видно, что главные системы мелких разрывов в точке наблюдения № 1603 могли образоваться в двух динамических обстановках: в зоне меридионального левого сдвига и при северо-восточном растяжении в зоне сброса. Так, проведенный анализ позволил определить морфогенетические типы разломов, первый из которых имеет место на схеме линеаментов рельефа (см. рис. 2), а второй – на геологической карте м-ба 1:50000 (см. рис. 1, А).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В начале раздела рассматриваются данные, полученные для решения первой задачи исследования, связанной с изучением радоновой активности подземных вод на участке Култук – Выдрино, а затем материалы по закономерностям разломообразования, выявление которых представляет вторую задачу проведенной работы.

#### 3.1. СОДЕРЖАНИЕ РАДОНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОЗ. БАЙКАЛ

Оценки объемной активности радона, полученные для участка исследований, варьируются в пределах  $0 \leq Q \leq 81.1$  Бк/л. Из графика, на котором все измерения выстроены через одинаковый интервал по оси абсцисс в порядке возрастания величины  $Q$  (рис. 4, Б), видно, что их подавляющее большинство не превышает 15 Бк/л. Согласно предложенной ранее классификации подземных вод Байкальского региона по содержанию радона [Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016], они относятся к группе I и представляют фон для Байкальской гидроминеральной провинции. Оставшиеся оценки соответствуют группе II ( $16 \leq Q < 100$  Бк/л) и для данной территории являются аномальными, их происхождение в большинстве случаев обусловлено приуроченностью водопроявления к разлому. Для подтверждения сделанного предположения необходимо создать однородную выборку значений параметра  $Q$ , в которой влияние факторов неструктурной природы на радиоактивность вод рассматриваемого участка было бы максимально ограничено.



**Рис. 2.** Разломы, выраженные в рельефе юго-западного побережья оз. Байкал.

*А* – новейшие разломы и схема распределения их плотности в изолиниях. *Б* – проявление разломов в виде линейментов на трехмерной модели рельефа, представленной для района Утулик – Хара-Мурин. 1–2 – крупные (1) и мелкие (2) разрывы, выраженные в рельефе; 3 – границы участка детальных исследований в районе г. Байкальска.

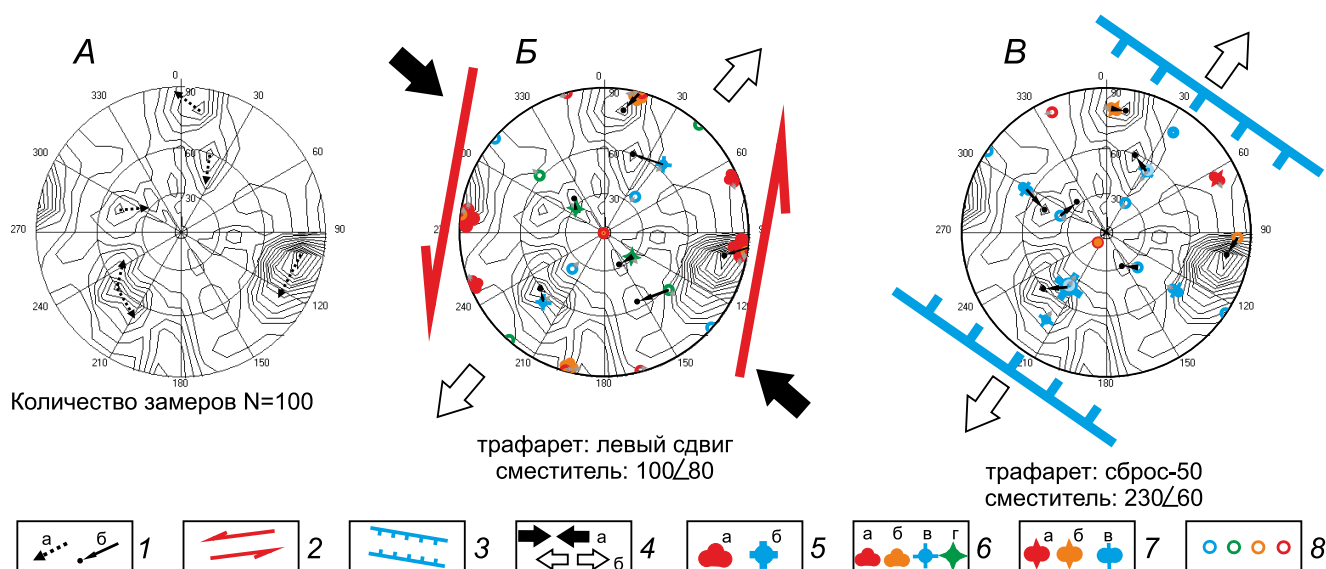
**Fig. 2.** Faults observed in the relief of the southwestern coast of Lake Baikal.

*A* – modern faults, and their distribution pattern in density isolines. *B* – faults shown as lineaments in the 3D relief model of Utulik – Khara-Murin area. 1–2 – large (1) and small (2) faults observed in the relief; 3 – boundaries of the area in the vicinity of the city of Baikalsk, which was studied in detail.

Прежде всего были рассмотрены вариации величины  $Q$  во времени, обусловленные сезонной периодичностью изменений атмосферного давления и температуры воздуха (планетарный фактор). Из рис. 4, *В*, где для примера такие вариации показаны для водопунктов № 1 и 2 с высоким и низким содержанием радона, видно, что значения  $Q$  для них не выходят за пределы величин, характерных для группы II и группы I, соответственно. При этом максимальные и минимальные значения в обоих случаях отличаются друг от друга в два раза и более. Как следствие, для каждого из 11 пунктов мониторинга в выборку для дальнейшего анализа было включено только одно значение, максимально приближенное по времени опробования к летнему периоду, в течение которого проводились измерения в подавляющем большинстве водоявлениях на участке Култук – Выдрино. Кроме того, из выборки были исключены оценки содержания радона в поверхностных водах (озера, ручьи, отстойники),

которые не поднимаются выше 0.3 Бк/л и представляют большинство точек, образующих левый субгоризонтальный отрезок графика на рис. 4, *Б*.

В итоге дальнейший анализ опирался на 74 проявления подземных вод, представляющих скважины, колодцы и родники, для которых был проведен статистический анализ зависимости содержания радона от таких характеристик, как температура воды ( $T$ ) и глубина пробоотбора (гидрогеологический фактор), а также тип скальной горной породы, к выходам которой приурочен водопункт (вещественный фактор), согласно полям их распространения на геологической карте м-ба 1:50000 (см. рис. 1, *А*). Анализ средних значений показал, что параметр  $Q$  имеет некоторую тенденцию к увеличению в ряду колодцы (9.2 Бк/л) – родники (10.0 Бк/л) – скважины (13.9 Бк/л). Он на несколько единиц больше у гранитов (10.4 Бк/л) по сравнению с метаморфитами (7.7 Бк/л) и основными интрузивами (3.9 Бк/л). Средние значения темпера-



**Рис. 3.** Анализ круговой диаграммы трещиноватости (т.н. b1603) посредством наложения эталонных трафаретов для выявления типа разломной зоны, в которой происходило формирование сети трещин.

А – круговая диаграмма трещиноватости (сетка Вульфа; верхняя полусфера; величина окна осреднения –  $10^\circ$ ; уровни изолиний – 1–2...14 %) с десятью максимумами, для части из которых характерны отчетливо направленные разбросы полюсов трещин. Б–Б' – два итоговых решения локального ранга о динамических обстановках левого сдвига (Б) и растяжения (Б'). 1 – направление разброса полюсов трещин, составляющих максимум (по П.Н. Николаеву) (а) и центр максимума (черный кружок), который соответствует одной из разрывных систем эталонного парагенезиса разрывов (б); 2–3 – положение левосдвиговой (2) и сбросовой (3) зоны локального ранга, в которых формировалась часть систем трещин, представленных на диаграмме; 4 – направление действия субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 5 – полюсы левосдвигового (а) и сбросового (б) сместителя 1-го порядка в эталоне; 6 – полюсы левосдвигового (а), правосдвигового (б), сбросового (в), взбросового (г) сместителя 2-го порядка; 7 – полюсы взбросо-сдвигового (а, б), сбросо-сдвигового (в) сместителя 2-го порядка в эталоне; 8 – полюс второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин в эталоне (цвет знака соответствует цвету главной системы тройственного парагенезиса).

**Fig. 3.** Analysis of the joint diagram (monitoring site b1603) using the reference matrixes to identify the types of fault zones, in which the joint networks were formed.

А – circle joint diagram (Wulff net; upper hemisphere; averaging window –  $10^\circ$ ; isolines levels – 1–2...14 %) showing 10 peaks, including those with a clearly directional scatter of joint poles. Б–Б' – two final solutions for the local rank in the settings of left-lateral strike-slip (Б) and extension (Б'). 1 – direction of the scatter of joint poles comprising the peak (according to P.N. Nikolaev) (a) and the centre of the peak (black circle), corresponding to one of the reference joint systems (b); 2–3 – locations of the left-lateral strike-slip (2) and normal (3) fault zones of the local rank, wherein the joint systems shown in the rose diagram was formed; 4 – direction of the subhorizontal axes of the main normal stresses of compression (a), and extension (b); 5 – poles of the left-lateral strike-slip (a), and normal (b) fault planes of the 1<sup>st</sup> order in the standard set; 6 – poles of the left-lateral strike-slip (a), right-lateral strike-slip (б), normal (в), and reverse (r) fault planes of the 2<sup>nd</sup> order; 7 – poles of the reverse-strike-slip (a, б), and normal-strike-slip (в) fault planes of the 2<sup>nd</sup> order in the standard set; 8 – poles of the secondary or supplemental system of the joint triplet in the standard set (the colours correspond to the colours of the main system in the joint triplet).

туры воды имеют тенденцию к небольшому возрастанию в ряду родники ( $6.6^\circ\text{C}$ ) – колодцы ( $7.7^\circ\text{C}$ ) – скважины ( $8.6^\circ\text{C}$ ).

Установленные вариации нельзя считать значимыми для вывода о существенном влиянии характеристик неструктурной природы на радиоактивность воды в пределах изучаемого участка земной коры. Они не приводят к переходу водопункта в смежную группу по радиоактивности. Это согласуется с результатами парной корреляции, которые показали практически полное отсутствие связей между значением объемной активности радона и глубиной пробоотбора или температурой воды.

Анализ проводился как для всего участка исследований, так и отдельно для района Утулик – Байкальск, характеризующегося наиболее плотной сетью опробованных водопунктов. В последнем случае можно лишь отметить, что на графике  $Q=f(T)$  для облака точек может быть проведена огибающая, которая свидетельствует о низком содержании радона в источниках с повышенной температурой воды.

Перспективы обнаружения взаимосвязей между изученными характеристиками подземных вод участка Култук – Выдрино связаны с расширением базы данных за счет опробования новых водо-

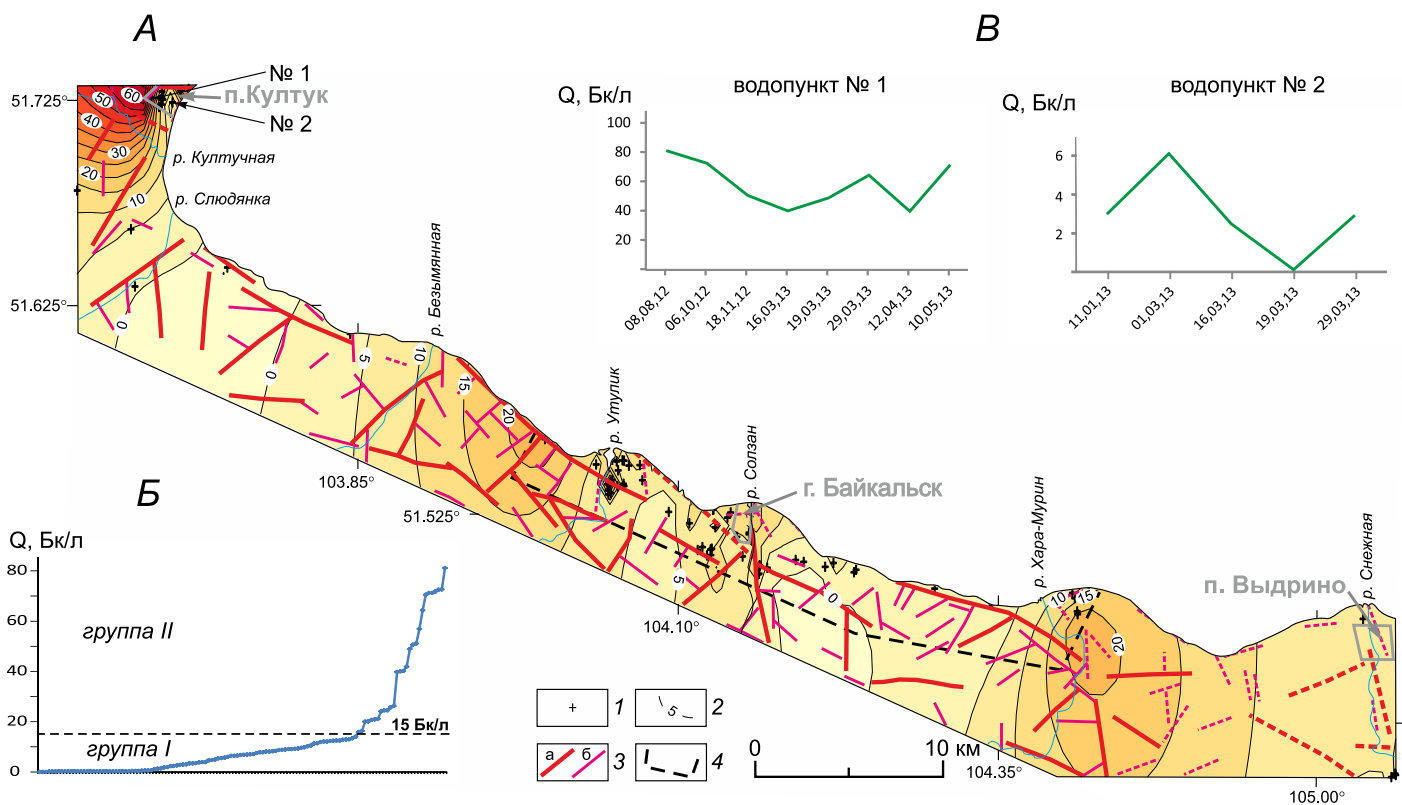


Рис. 4. Результаты исследования радиоактивности подземных вод на юго-западном побережье оз. Байкал.

А – схема распределения объемной активности радона (Q) в изолиниях на участке Култук – Выдрино. Б – график распределения содержания радона в опробованных водопрооявлениях, на которых значения Q расположены в порядке возрастания через одинаковые расстояния по оси абсцисс (уровень 15 Бк/л, разделяющий группы водопрооявлений I и II, по [Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016]). В – временные вариации содержания радона в водопрооявлениях, представляющих аномальный (водопункт № 1) и фоновый (водопункт № 2) уровни радиоактивности подземных вод в окрестностях п. Култук. 1 – места опробования подземных вод; 2 – изолинии уровня параметра Q (Бк/л); 3 – крупные (а) и мелкие (б) новейшие разломы (пунктир – предполагаемое положение); 4 – границы участка детальных исследований подземных вод в районе г. Байкальска.

Fig. 4. Results of the groundwater radioactivity study of the southwestern coast of Lake Baikal.

А – schematic scatter of radon volume activity (Q, in isolines) in the Kultuk – Vydrino area. Б – radon concentration distribution in the sampled water sources; the Q values are shown increasing at the same distance on the abscissa (the level of 15 Bq/l, separating the water sources of groups I and II, after [Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016]). В – variations of radon concentrations in time in the water sources showing the anomalous (water source No. 1) and background (water source No. 2) levels of groundwater radioactivity in the vicinity of the village of Kultuk. 1 – locations of groundwater sampling sites; 2 – isolines of Q values (Bq/l); 3 – large (a) and small (б) modern faults (dashed line – assumed); 4 – boundaries of the area in the vicinity of the city of Baikalsk, which was studied in detail.

проявлений, с увеличением точности определения глубины пробоотбора и температуры воды, с использованием более детальной геологической карты для привязки водопрооявлений к определенным типам горных пород и др. Однако на данном этапе исследований созданную выборку можно считать в первом приближении однородной по отношению к структурному фактору, т.е. по большому счету не зависящей от изученных параметров. Это позволяет использовать ее на предмет оценки роли структурного фактора в распределении подземных вод с повышенной концентрацией радона на юго-западном фланге Южно-Байкальской рифтовой впадины.

В первую очередь, на основе созданной выборки была построена схема распределения параметра Q

на площади исследований в изолиниях (рис. 4, А). Для распределения характерна явно выраженная неравномерность, которая проявляется в чередовании вдоль побережья озера участков с практически полным отсутствием радона в подземных водах и областей с его аномальными концентрациями ( $Q > 15$  Бк/л). В первом приближении такие аномалии располагаются в окрестностях устьев рек Хара-Мурун, Солзан, Утулик, Култучная, а также в междуречье рек Безымянная и Утулик. На участке Утулик – Байкальск распределение усложняется, что связано с более плотной сетью опробования и будет детально рассмотрено в заключительном разделе статьи. Что же касается неоднородности 1-го порядка, то для ее интерпретации необходимо



установить наиболее общие закономерности разломообразования в пределах изучаемого участка земной коры.

### 3.2. Разломная структура юго-западного борта Южно-Байкальской впадины

Для выявления закономерностей формирования разломной структуры изучаемого участка земной коры был проведен общий и парагенетический анализ трех видов разрывных нарушений. Это, прежде всего, разломы, выявленные геологами-съемщиками при составлении Государственной геологической карты м-ба 1:50000 (см. рис. 1, А), затем – новейшие разрывы, проявленные линейментами в рельефе (см. рис. 2), и, наконец, трещины горных пород, массовые измерения которых были проведены вблизи некоторых крупных разрывов (см. рис. 1, А).

Анализ геологической карты (см. рис. 1, А) свидетельствует о том, что участки проявления скальных пород, не перекрытые молодыми осадками, интенсивно нарушены разломами. Самым крупным из них является сместитель Главного Саянского разлома. В интерпретации авторов рассматриваемой карты он проходит под водами озера субпараллельно берегу и имеет место под четвертичными осадками междуречья рек Хара-Мурин и Снежная – с одной стороны и реки Култучной – с другой. Северо-западнее, за границами участка исследований, дизъюнктив проявляется в скальных породах в виде разнотипных тектонитов, зон расланцевания и повышенной трещиноватости, спрямленных элементов рельефа, изгибов речных русел и других признаков, позволивших протрассировать его от п. Култук на многие сотни километров [Berzin, 1967; Suvorov, 1977; Sherman, Dneprovsky, 1989; Aleksandrov, Taskin, 1990; Sherman et al., 1991; Balla et al., 1991; Levi et al., 2012].

Линейные размеры дизъюнктива, а также представления, существующие в тектонофизике об областях динамического влияния разломов [Sherman et al., 1983; Seminsky, 2003], позволяют рассматривать разрывную сеть участка Култук – Утулик как составляющую часть зоны Главного Саянского разлома. Косвенно это подтверждается тем, что разрывы северо-западного простирания существенно преобладают по отношению к разломам трех других систем, выделяющихся на роза-диаграмме, построенной по материалам анализируемой карты (см. рис. 1, Б). Следует отметить, что применение парагенетического анализа к рассматриваемой диаграмме не представляется эффективным. Системы отличаются по ориентации примерно на 45°, что предполагает несколько равнозначных, но противоположных по типу вариантов решений о

динамической обстановке формирования структуры зоны Главного Саянского разлома.

Определения кинематики, сделанные авторами геологической карты для отдельных разрывов изучаемой территории (см. рис. 1, А), свидетельствуют о сложной истории подвижек по разломам северо-западного простирания. Лучу 1 на роза-диаграмме (см. рис. 1, Б), кроме нескольких правых сдвигов, соответствует взброс, который располагается в районе р. Безымянная и имеет длину более 10 км (см. рис. 1, А). Судя по результатам исследований кинематики Главного Саянского разлома [Berzin, 1967; Suvorov, 1977; San'kov et al., 2004; Levi et al., 2012], этот дизъюнктив в течение длительного времени своего существования (поздний архей – кайнозой) испытывал активизацию в разных динамических обстановках, т.е. был взбросом, сбросом, правым или левым сдвигом. Для фанерозоя большинством исследователей признается доминирование в зоне Главного Саянского разлома горизонтальных смещений: левосторонних (со сбросовой компонентой) – для кайнозоя и правосторонних (со взбросовой компонентой) – для более раннего времени [Suvorov, 1977]. Кроме того, результаты целенаправленных исследований Н.А. Берзина [Berzin, 1967] свидетельствуют об обстановке сжатия в раннем – среднем палеозое, которая проявилась наиболее интенсивно в пределах юго-восточной части Восточного Саяна.

Таким образом, анализ геологических материалов позволяет сделать вывод, что разрывная сеть участка исследований представляет структуру юго-западного крыла Главного Саянского разлома. Она формировалась в течение нескольких этапов в разных полях напряжений. На этапе кайнозойского рифтообразования разломная зона представляет борт глубокой Южно-Байкальской впадины, что свидетельствует о существенной вертикальной компоненте смещений. Горизонтальные подвижки характеризуются левосдвиговой кинематикой, согласующейся с ориентировкой разлома (аз. прост. – 300°) по отношению к вектору растяжения (аз. прост. – 310°).

Анализ схемы новейших разломов (см. рис. 2), представляющих спрямленные элементы рельефа, проводился с целью определения, во-первых, характера нарушенности юго-западного борта рифтовой впадины, а во-вторых, динамических обстановок формирования разломной сети в целом (1-й порядок) и отдельных разрывных систем, в частности (2-й порядок). Судя по распределению плотности новейших разломов в изолиниях (см. рис. 2, А), зона Главного Саянского разлома характеризуется неравномерной нарушенностью. Вдоль ее простирания имеет место чередование максимумов и минимумов плотности, из которых самый интен-

сивный располагается в междуречье рек Безымянная и Утулик, а наименее интенсивный – в районе р. Снежная. Максимумы в основном связаны с перемычками между крупными разломами северо-западного простирания или узлами их пересечения с поперечными разрывными нарушениями.

Для выявления динамических обстановок формирования структуры Главного Саянского разлома на участке исследований был применен парагенетический анализ, который обычно используется для интерпретации линеаментных сетей [Sim, 1991]. Модификации метода отличаются эталонными наборами разрывов 2-го порядка, применяющимися для сопоставления с сетью природных разломов. В данном случае это парагенезис разрывов, синтезированный с учетом данных предшественников, а также результатов собственных исследований природных и экспериментально воспроизведенных дизъюнктивов. Этот единый в механическом отношении парагенезис имеет четыре разновидности, соответствующие известным морфогенетическим типам разломов, формирующимся в динамических обстановках сжатия, растяжения, правого или левого сдвига (рис. 5, B-E). Первый опыт его применения был получен при использовании сдвиговых парагенезисов для интерпретации сети платформенных линеаментов [Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016]. В дальнейшем А.В. Черемных (устное сообщение) успешно применил те же эталонные наборы разрывных систем для территории Западного Прибайкалья, характеризующейся доминированием вертикальных движений земной коры.

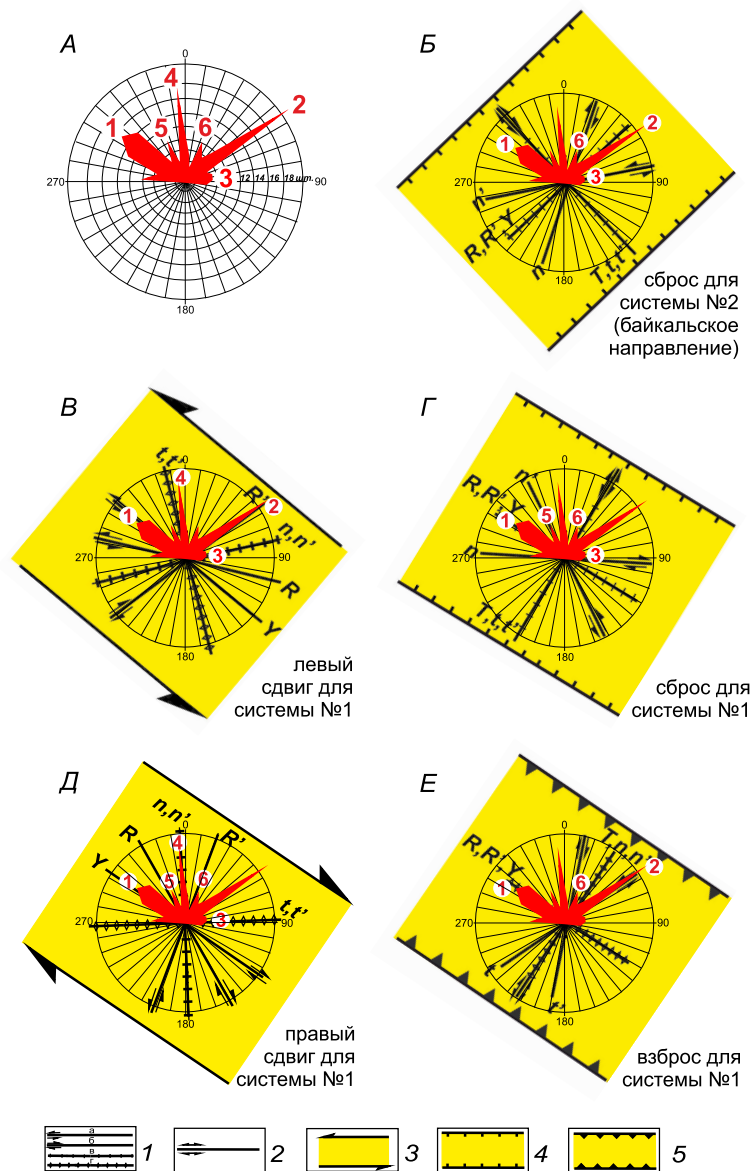
Основой для парагенетического анализа послужила роза-диаграмма простираний линеаментов участка Култук – Выдрино, свидетельствующая о существовании на изучаемой территории шести систем новейших разломов (рис. 5, A): северо-западной (1), северо-восточной (2), субширотной (3), субмеридиональной (4), север-северо-западной (5) и север-северо-восточной (6). Система 1 включает наибольшее количество разрывов и по простиранию соответствует показанному на карте (см. рис. 1, A) сместителю зоны Главного Саянского разлома. Это является основанием для совмещения с ней системы Y-сколов магистрального сместителя в эталонных парагенезисах разрывов 2-го порядка для каждого из четырех возможных типов разломных зон: левого сдвига (рис. 5, B), сброса (рис. 5, Г), правого сдвига (рис. 5, Д) и взброса (рис. 5, E).

Сопоставление анализируемых вариантов показало, что наиболее полным является совпадение лучей роза-диаграммы с эталоном правого сдвига (рис. 5, Д). Правосдвиговым типом перемещений в зоне Главного Саянского разлома может быть объяснено происхождение всех систем (1, 3–6) за ис-

ключением второго по значимости луча 2. Наименее подходит для интерпретации роза-диаграммы эталон взброса (рис. 5, E), так как совпадение наблюдается только для двух главных систем – 1 и 2 и отчасти – для второстепенного луча 6. Два других варианта находятся примерно в равном положении: совпадают по четыре луча, но для эталона левого сдвига (рис. 5, B) это главные системы (1–4), а для сброса (рис. 5, Г) – две главные (1 и 3) и две второстепенные (5 и 6).

Таким образом, проведенный анализ подтверждает существование в истории формирования Главного Саянского разлома право- и левосдвиговых этапов развития, первый из которых, судя по данным предшественников [Berzin, 1967; Suvorov, 1977; Sherman et al., 1991; San'kov et al., 2004; Levi et al., 2012], имел место в докайнозойское, а второй – в кайнозойское время и связан с раскрытием Байкальского рифта. Характерно то, что, если рассматривать парагенезис растяжения для этой северо-восточной структуры 1-го порядка (рис. 5, B), то для зоны Главного Саянского разлома находит объяснение не только левый сдвиг, но и растяжение. Соответствующий этому дизъюнктиву луч 1 относится к системе трансформационных разрывов, характеризующихся двойственной природой [Seminsky, 2003]. С одной стороны, они, простираясь в направлении тектонического транспорта, выполняют функцию сдвигов, согласующих кинематику перемещений по отдельным крупным сбросам, которые, как правило, отличаются скоростями и направлениями движений. Выполнение Главным Саянским разломом подобной функции в ранние периоды кайнозойского тектогенеза отмечено в работах К.Г. Леви, З. Балла и др. [Balla et al., 1991; Levi et al., 2012]. С другой стороны, по поперечным разрывам происходит дополнительное к основному растяжение коры, что было установлено для океанических и континентальных рифтов, включая Байкальский [Lamakin, 1968; Golenetsky, Misharina, 1978; Soloviev et al., 1989; Melnikova, Radziminovich, 1998; Seminsky, 2003]. В ходе общего растяжения коры кинематика трансформационного разлома в отдельные периоды его активности может быть различной или смешанной, о чем, например, свидетельствует механизм очага (левый сбросо-сдвиг) упомянутого выше Култукского землетрясения (27.08.2008 г., M=6.3) в зоне Главного Саянского разлома.

Существование, по крайней мере, трех динамических обстановок для формирования внутренней структуры зоны Главного Саянского разлома (растяжение, правый и левый сдвиги) объясняет происхождение всех систем разрывов, выделенных для участка Култук – Выдрино. При этом некоторые направления разломов могли иметь различную



**Рис. 5.** Результаты анализа сети новейших разрывов на участке Култук – Выдрино, проведенного с использованием эталонных парагенезисов разрывов 2-го порядка, формирующихся в зоне сброса, взброса, правого или левого сдвига [Seminsky, 2014].

*A* – роза-диаграмма простираний разломов, представленных на рис. 2, *A* (цифры – номера систем). *B* – интерпретация формирования системы 1, которой принадлежит сместитель Главного Саянского разлома, при помощи эталонного парагенезиса зоны растяжения, ориентированной в соответствии с простиранием Байкальского рифта. *B* – интерпретация формирования разломных систем 1, 2, 3 и 4 при помощи эталонного парагенезиса разрывов 2-го порядка в зоне левого сдвига, ориентированной в соответствии с простиранием Главного Саянского разлома. *Г* – то же для систем 1, 3, 5 и 6 в зоне сброса. *Д* – то же для систем 1, 3, 4, 5 и 6 в зоне правого сдвига. *Е* – то же для систем 1, 2 и 6 в зоне взброса. 1 – плоскости левых сдвигов (*a*), правых сдвигов (*b*), сбросов (*v*) и взбросов (надвигов) (*r*) 2-го порядка; 2 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка (в зоне сдвига совпадают с плоскостью рисунка); 3–5 – зоны левого сдвига (3), сброса (4) и взброса (надвига) (5) 1-го порядка (латинские буквы – системы, однотипные в механическом отношении).

**Fig. 5.** Results of the analysis of the modern fracture system in the Kultuk – Vydrino area. Standard sets: parageneses of the 2<sup>nd</sup> order fractures formed in the zones of normal, reverse, right- and left-lateral strike slip faults (after [Seminsky, 2014]).

*A* – rose diagram of the faults shown in Fig. 2 *A* (numbering is similar to that of the fault systems). Interpretation of formation of fault systems: *B* – fault system 1, including the fault plane of the Main Sayan fault, using the standard set of fractures in the extension zone oriented in accordance with the strike of the Baikal rift; *B* – fault systems 1, 2, 3, and 4, using the standard set of the 2<sup>nd</sup> order fractures in the left-lateral strike-slip fault zone oriented in accordance with the strike of the Main Sayan fault; *Г* – fault systems 1, 3, 5, and 6 in the normal fault zone; *Д* – fault systems 1, 3, 4, 5, and 6 in the right-lateral strike-slip fault zone; *Е* – fault systems 1, 2, and 6 in the reverse fault zone. 1 – planes of left-lateral strike-slip (*a*), right-lateral strike-slip (*b*), normal (*v*), and reverse (thrust) (*r*) faults of the 2<sup>nd</sup> order; 2 – planes of transverse strike-slip faults of the 2<sup>nd</sup> order (in the strike-slip zone, the fault planes coincide with the plane of the figure); 3–5 – left-lateral strike-slip (3), normal (4), and reverse (thrust) (5) fault zones of the 1<sup>st</sup> order (mechanically similar systems are marked by Latin letters).

кинематику на разных этапах активизации. Более того, нельзя исключать и наличие обстановки сжатия в истории развития этого крупного долгоживущего дизъюнктива (рис. 5, *E*), так как три главных члена соответствующего эталонного парагенезиса (взбросы главного сместителя и две системы сопряженных правых и левых сдвигов) совпадают с лучами 1, 2 и 6 на роза-диаграмме. Следовательно, полученные результаты должны быть конкретизированы путем применения независимого метода исследований, которым в данном случае являлся анализ трещиноватости вблизи некоторых новейших или более древних разломов (см. рис. 1, *A*; рис. 2, *A*).

Анализ десяти диаграмм трещиноватости посредством их совмещения с эталонными парагенезисами систем мелких разрывов, образующихся в зонах влияния правого сдвига, левого сдвига, взброса, надвига или сброса, позволил получить 22 локальных решения, представленных на сводной диаграмме рис. 6, *A*. Для отдельных диаграмм было реконструировано от одной до трех динамических обстановок формирования трещинной сети (см., например, рис. 3). В целом это семь зон левого сдвига, три зоны правого сдвига, шесть взбросов и шесть сбросов. Локальные разломы образуют три луча на роза-диаграмме (рис. 6, *A*), которые совпадают с выделенными ранее системами новейших разломов 1, 3 и 4. Если принять во внимание, что разломной системе 2 соответствуют локальные правосдвиговое и взбросовое решения в пунктах 43905 и b1602, то можно считать, что на уровне главных систем результаты парагенетического анализа линеаментов и трещин совпадают.

Данный вывод позволяет использовать локальные разломы, реконструированные при анализе трещинных сетей в отдельных пунктах геологоструктурных измерений, для подтверждения правомерности существования обстановок левого сдвига, сброса, правого сдвига и взброса, выделенных в истории формирования Главного Саянского разлома путем парагенетического анализа новейших разломов на участке Култук – Выдрино. Как видно из рис. 6, *B-D*, в локальных разрывных нарушениях находит наибольшее отражение кайнозойская структура Главного Саянского разлома, формирующаяся в обстановках левого сдвига (рис. 6, *B*) и растяжения (рис. 6, *B*). Восемь решений (5 – левые сдвиги, 1 – правый сдвиг, 1 – сброс, 1 – взброс) относятся к первой из них и шесть (5 – сбросы, 1 – левый сдвиг) – ко второй.

Более древние из обстановок, рассмотренных ранее в рамках парагенетического анализа новейших разломов, проявлены в локальных решениях менее отчетливо. Несмотря на то что правосдвиговой парагенезис наиболее полно объясняет проис-

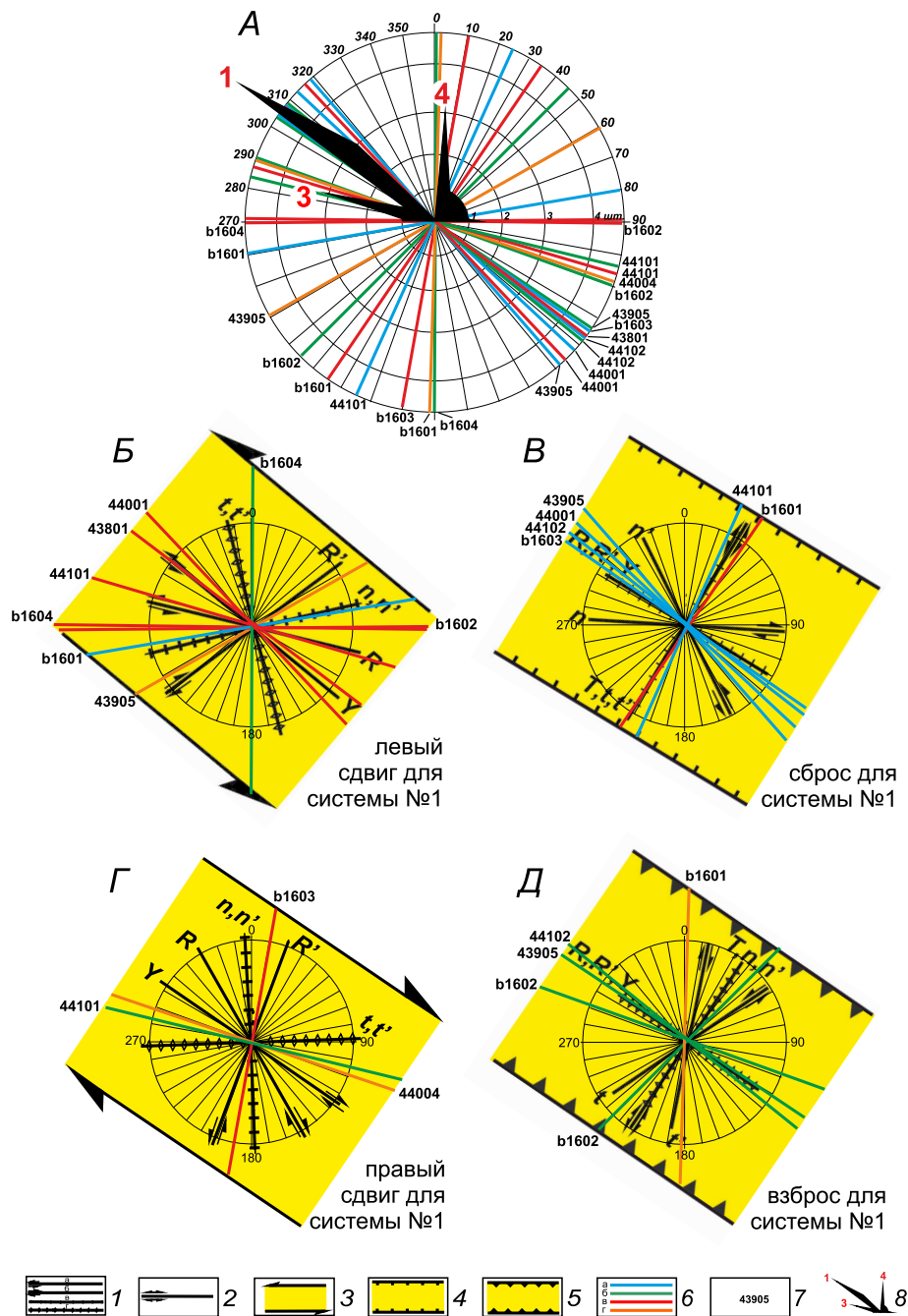
хождение систем новейших разломов (см. рис. 5, *D*), на локальном уровне ему соответствуют всего три разлома: один левый сдвиг, один правый сдвиг и один взброс (рис. 6, *Г*). В противоположность этому взброс, слабо проявленный на уровне новейших разломов (см. рис. 5, *D*), подтверждается пятью локальными решениями, среди которых 4 взброса и 1 правый сдвиг (рис. 6, *Д*). Необходимо отметить, что правомерность выделения этих динамических обстановок для истории развития внутренней структуры зоны Главного Саянского разлома подтверждается кинематикой, показанной на геологической карте (см. рис. 1, *A*) для четырех разрывов северо-западной ориентировки: три правых сдвига и один взброс.

Таким образом, синтез результатов, полученных при изучении разрывных сетей, представленных на Государственной геологической карте м-ба 1:50000, схеме линеаментов рельефа, а также в публикациях предшественников, показал, что разломная структура участка исследований сформировалась витоге разнотипных подвижек в зоне Главного Саянского разлома. Сместитель этого крупнейшего в регионе дизъюнктива проходит вблизи берега по дну оз. Байкал. Участок исследований Култук – Выдрино принадлежит к его юго-западному крылу, о состоянии разломной структуры которого для последних этапов тектогенеза дает представление рис. 2, *A*, а об основных типах движений – рис. 5, *B-E*.

Зона Главного Саянского разлома имеет на суше ширину не менее 7 км и характеризуется неравномерной нарушенностью субстрата в продольном направлении. Наиболее крупные максимумы раздробленности земной коры тяготеют к местам осложнения внутренней структуры, представленным перемычками между крупными разломами северо-западного простирания и/или узлам их пересечения с поперечными разрывными нарушениями, которые являются концентраторами напряжений на каждом этапе развития дизъюнктива (см. рис. 2, *A*). Согласно результатам парагенетического анализа новейших разломов и трещин, для фанерозоя выделяются как минимум три таких этапа, которые, привлекая данные из литературы [Berzin, 1967; Suvorov, 1977; San'kov et al., 2004; Levi et al., 2012], можно расположить в следующей временной последовательности.

В раннем – среднем палеозое (этап 1) Главный Саянский разлом формировался в условиях сжатия (см. рис. 5, *E*; рис. 6, *Д*). Кроме северо-западных взбросов (надвигов) главного сместителя, из разрывов 2-го порядка в современном рельефе и тектонической трещиноватости проявляются северо-северо-восточные взбросы (надвиги) и субмеридиональные правые и северо-восточные левые





**Рис. 6.** Распределение локальных решений о типе и ориентировке локальных разломных зон, полученных при анализе трещиноватости в отдельных пунктах наблюдения на участке Култук – Выдрино (А), по эталонным парагенезисам разрывов 2-го порядка в зоне левого сдвига (Б), зоне сброса (В), зоне правого сдвига (Г) и зоне взброса (Д), ориентированным в соответствии с простираем Главного Саянского разлома.

1–5 – см. обозначения 1–5 на рис. 5; 6 – локальные решения об ориентировке сброса, взброса, левого и правого сдвига, полученные при парагенетическом анализе трещиноватости; 7 – номер пункта массового замера трещин, по которому получено решение; 8 – роза-диаграмма простираений разнотипных локальных разломов, выделенных для участка исследования в результате парагенетического анализа круговых диаграмм трещиноватости (цифры у лучей соответствуют номерам, обозначающим системы новейших разломов на рис. 5, А).

**Fig. 6.** Distribution of the local solutions showing the types and orientations of the local fault zones, obtained by analyzing the joints on the monitoring sites in the Kultuk – Vydrino area (A) based on the standard sets of the 2<sup>nd</sup> order fractures in the left-lateral strike-slip (Б), normal (B), right-lateral strike-slip (Г), and reverse (Д) faults zones oriented in accordance with the strike of the Main Sayan fault.

1–5 – see the legend in Fig. 5; 6 – local solutions on the orientations of the normal, reverse, left- and right-lateral strike-slip faults, which are obtained by the paragenetic analysis of fracturing in the study area; 7 – numbers of mass joint measurement sites; 8 – rose diagram showing the strike of local faults varying in types, which were identified in the study area by the paragenetic analysis of the joint rose diagrams (numbering is similar to that of the modern fault systems in Fig. 5, A).

Т а б л и ц а 1. **Обстановки формирования главных разломных систем, имевшие место при разнотипных движениях в зоне Главного Саянского разлома на участке Култук – Выдрино**T a b l e 1. **Setting of the Kultuk – Vydrino area, wherein the main fault systems developed due to movements of various types in the Main Sayan fault zone**

Номер системы (см. рис. 5, А)	Ориентация системы	Обстановка формирования разрывов в условиях разной кинематики Главного Саянского разлома			
		Докайнозойское время		Кайнозойское время	
		взброс	правый сдвиг	левый сдвиг	сброс
1	северо-запад	сжатие	сдвиг (п)	сдвиг (л)	растяжение
2	северо-восток	сдвиг (л)		сдвиг (п)	
3	субширотная		сжатие	сдвиг (л)	сдвиг (п)
4	субмеридиональная	сдвиг (л)	растяжение	сжатие	
5	север-северо-запад		сдвиг (п)		сдвиг (л)
6	север-северо-восток	сжатие	сдвиг (л)		растяжение, сдвиг

П р и м е ч а н и е. л – сдвиг левый; п – сдвиг правый.

N o t e. л – left-lateral strike-slip fault; п – right-lateral strike-slip fault.

сдвиги. На следующем этапе (этап 2) развития дизъюнктив активизировался как правый сдвиг с практически полным набором вторичных разрывных систем (см рис. 5, Д; рис. 6, Г): северо-западные и север-северо-западные правые сдвиги, север-северо-восточные левые сдвиги, субмеридиональные сбросы и субширотные взбросы (надвиги).

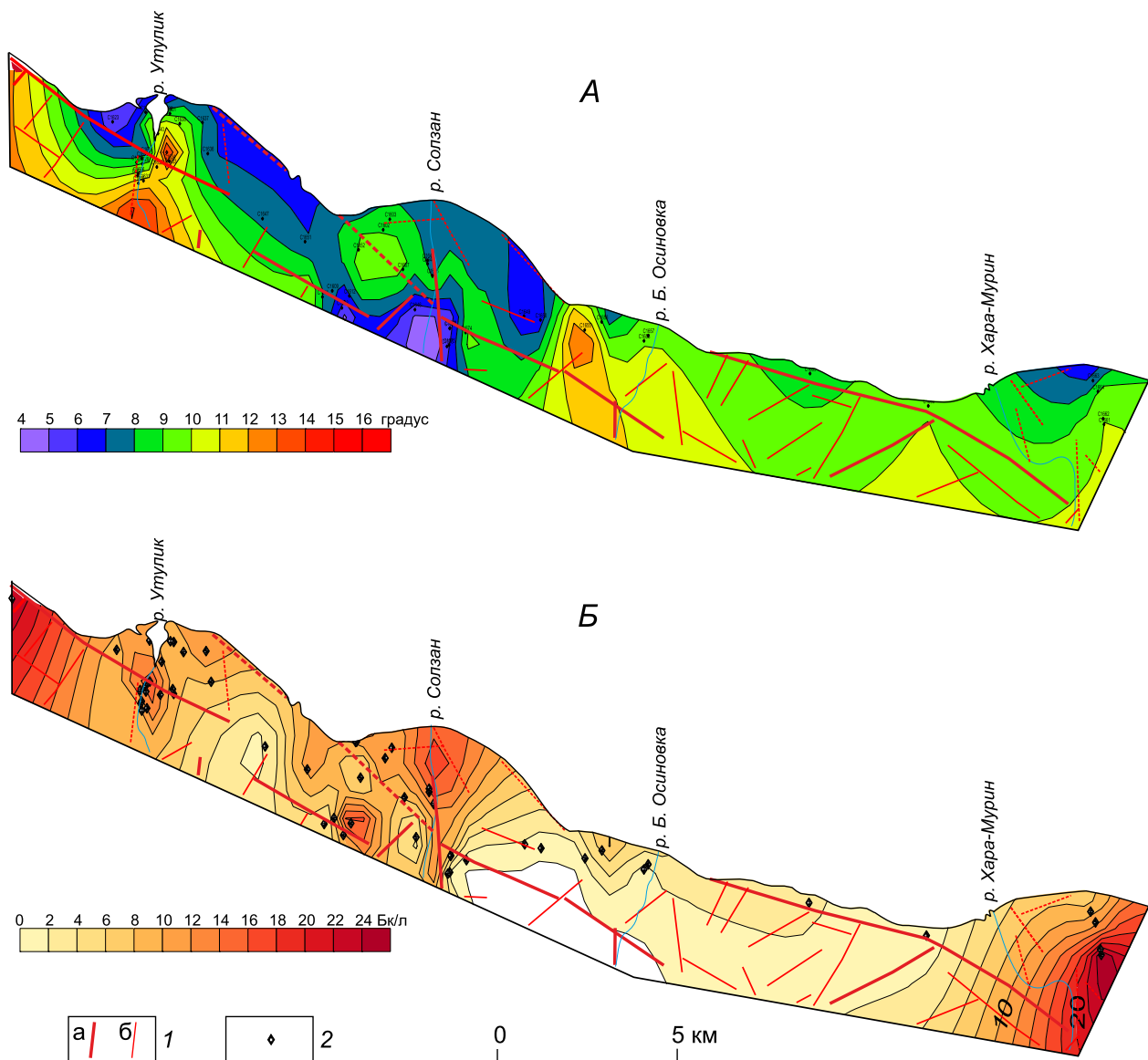
На кайнозойском этапе развития (этап 3) Главный Саянский разлом играет роль трансформационной структуры, которая имеет двойную кинематику, связанную с развитием Байкальского рифта и, в частности, – с механизмом раскрытия Южно-Байкальской впадины. Прежде всего, дизъюнктив выполняет функции трансформационного левого сдвига (см. рис. 5, В; рис. 6, Б), в зоне которого, помимо северо-западных разломов подобной кинематики, имеют место северо-восточные правые сдвиги, субширотные левые сдвиги и субмеридиональные взбросы. Кроме того, Главный Саянский разлом, представляя юго-западный борт Южно-Байкальской впадины, способствует продольному растяжению земной коры в ходе рифтообразования. При этом северо-западные разломы на участке исследования являются сбросами, субширотные – правыми сдвигами, север-северо-западные – левыми сдвигами, а север-северо-восточные – сбросами или сдвигами (см. рис. 5, Г; рис. 6, В).

В плане достижения цели данного исследования, связанной с формированием подземных вод, важным является то, что все шесть выявленных на участке Култук – Выдрино систем разломов (см. рис. 5, А) являются активными на последнем этапе тектогенеза и, следовательно, могут служить путями миграции флюидов. Вместе с тем степень проницаемости дизъюнктивов должна быть различной вследствие отличий в истории развития раз-

рывной структуры в зонах их динамического влияния. Так (табл. 1), при прочих равных условиях северо-западные разломы наиболее эффективны в плане миграции подземных вод и газов, поскольку они не только активизировались на всех этапах тектогенеза, но и развивались во всех возможных типах динамических обстановок (сжатие, растяжение, сдвиг). Далее следуют разрывные нарушения север-северо-восточной и субмеридиональной ориентировок, так как их структура формировалась также при сжатии, растяжении и сдвиге на трех этапах тектогенеза. Меньшая проницаемость должна быть характерна для субширотных разломных зон (два этапа активизации в двух разновидностях обстановок) и, тем более, для северо-восточных и север-северо-западных дизъюнктивов, поскольку они формировались на двух этапах и только в одной – сдвиговой – обстановке.

#### 4. СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР КОНТРОЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ РАДОНА НА УЧАСТКЕ КУЛТУК – ВЫДРИНО

Для решения третьей задачи исследования были сопоставлены особенности распределения вод с повышенным содержанием радона и закономерно-сти разломообразования на юго-западном фланге Южно-Байкальской рифтовой впадины, представленные в двух предыдущих разделах статьи. Как видно из рис. 4, А, и рис. 2, А, аномалии содержания радона в водопроявлениях ( $Q > 15$  Бк/л) пространственно совпадают с максимумами плотности новейших разломов. Отсутствие аномалий параметра  $Q$  в одном крупном максимуме (междуречье рек Солзан и Хара-Мурин) и одном-двух более мелких,



**Рис. 7.** Распределение температуры (А) и содержания радона (Б) в подземных водах участка их детального исследования в районе г. Байкальска. 1 – крупные (а) и мелкие (б) новейшие разломы (пунктир – предполагаемое положение); 2 – места опробования подземных вод.

**Fig. 7.** Temperature (А) and radon concentration (Б) patterns in groundwater samples taken near the town of Baikalsk. 1 – large (a) and small (б) modern faults (dashed line – assumed); 2 – groundwater sampling sites.

по-видимому, связано с отсутствием данных опробования водопроявлений. Установленная закономерность объясняется тем, что в пределах участков с высокой нарушенностью повышается вероятность связи водопроявлений с разломами, для которых уровни концентрации радона выше, чем в окружающих блоках [Steinitz et al., 1992; Guerra, Etiope, 1999; Agarwal et al., 2006; Malakootian et al., 2014; Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016; и др.].

Для выявления ключевых особенностей структурного контроля вод с повышенной радиоактивностью был более детально изучен участок Утулик – Хара-Мурин, в центральной части которого нахо-

дится г. Байкальск и создана наиболее плотная сеть опробованных водопроявлений. Судя по площадному распределению параметра Q (рис. 7, Б), аномалии данной величины связаны с узлами пересечения или сочленения северо-западных продольных разломов и поперечных нарушений субмеридиональной и север-северо-восточной ориентировок. Это именно те разрывы, зоны влияния которых, по данным проведенного ранее анализа, должны быть наиболее проницаемыми вследствие интенсивной структурной «проработки»: разломы рассматриваемых направлений претерпели активизацию во всех динамических обстановках

Т а б л и ц а 2. Характеристика подземных вод из скважин С1630 и С1612

Table 2. Characteristics of groundwater from drilled holes C1630 and C1612

№	Формула Курлова	Тип воды	Q, Бк/л	T, °C
C1630	$H_4SiO_4 20Rn 11.3M 0.18 \frac{HCO_3 68SO_4 25}{Ca 63Mg 25 [Na 11]} T7$	вода сульфатно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая, пресная	41.9	7.0
C1612	$H_4SiO_4 23Rn 6.5M 2 \frac{HCO_3 91 [SO_4 6]}{Ca 72 [Mg 23 Na 5]} T6$	вода гидрокарбонатная кальциевая, пресная	24.5	8.5

П р и м е ч а н и е. Содержание радона в формуле Курлова приводится в эманах.

N o t e. In the Kurlov formula, a unit of radon concentration is emans.

(сжатие, растяжение, сдвиг) в течение трех этапов тектогенеза.

Вытянутость изолиний, в т.ч. и оконтуривающих максимумы параметра Q (рис. 7, Б), свидетельствует о доминировании поперечных разрывов над продольными в контроле вод с повышенным содержанием радона. Особенно отчетливо это видно на примере разлома, который проходит по долине р. Солзан и в распределении параметра Q выделяется единым максимумом, вытянутым в меридиональном направлении. Ассоциация, включающая вытянутый максимум, поперечный разлом и долину, имеет место и для других рек, текущих с хр. Хамар-Дабан в оз. Байкал, – Утулик, Б. Осиновка, Хара-Мурин. Это позволяет предположить, что на рассматриваемой территории подземные воды в существенной степени являются трещинно-жильными и формируются за счет подземного и поверхностного стока, контролируемого интенсивно нарушенными разломными зонами. Положение максимумов параметра Q в пределах таких зон, как уже отмечалось, определяется местами их сочленения с продольными северо-западными разломами, где вследствие повышенной нарушенности и проницаемости пород воды насыщаются радоном с большей интенсивностью.

Кроме отмеченного структурного фактора, на повышение радиоактивности вод оказывает отчетливое влияние их температура. Несмотря на то, что ранее проанализированная связь между параметрами Q и T оказалась статистически незначимой, распределения их величин на участке Утулик – Хара-Мурин во многом подобны, хотя и характеризуются противоположными тенденциями (рис. 7, А, Б). Так, сравнительно холодные и более радиоактивные воды тяготеют к побережью Байкала и, наоборот, более теплые и менее радиоактивные – к предгорьям хр. Хамар-Дабан. При этом, если рассматривать расположение экстремумов, то максимумы параметра Q явно тяготеют к областям минимальных значений T.

Следует отметить, что вариации содержания радона в направлении предгорья – берег озера могут в какой-то мере зависеть от изменения скорости движения подземных вод. Данный вопрос требует отдельного целенаправленного исследования, так как мнения специалистов о характере подобной зависимости расходятся. Это позволяет на данном этапе работ в качестве основной причины выявленной закономерности рассматривать изменение температуры воды, тем более что для некоторых регионов обратная связь между параметрами Q и T установлена достаточно определенно [Erdogan et al., 2013; Schubert et al., 2012]. Поскольку радиоактивный газ лучше растворяется в водах с более низкой температурой, повышение радиоактивности наблюдается у побережья Байкала, где под влиянием озера происходит охлаждение подземных вод.

В данном контексте не случайным является то, что водопункт с максимальным содержанием радона располагается вблизи берега (см. рис. 1, А, С1630), причем определенная для него величина Q (41.9 Бк/л) в полтора раза или более превышает значение данного параметра в девяти других источниках, которые на рассматриваемой площади принадлежат к группе аномальных (Q>15 Бк/л). Для источников, находящихся в предгорьях, причиной повышенной радиоактивности, скорее всего, является структурный фактор, т.е. интенсивная нарушенность фрагмента разломной зоны. Таков, например, второй по радиоактивности на участке Утулик – Хара-Мурин водопункт С1612 (см. рис. 1, А), который подобен водопроявлению С1630 по составу и температуре (табл. 2).

Таким образом, сопоставление структурных и эманационных данных позволило установить закономерности распространения подземных вод с повышенной концентрацией радона на участке Култук – Выдрино, отличающемся высокой геодинамической активностью и, как следствие, сложным разломным строением. Кроме того, получен-



ные материалы позволяют сделать заключение практического характера относительно возможности использования инфраструктуры и людских ресурсов г. Байкальска, где недавно был закрыт целлюлозно-бумажный комбинат, для организации курортно-санаторной зоны, ориентированной на использование природных вод с радоном. С учетом того, что подобный курорт в Тункинской долине («Нилова Пустынь») характеризуется значениями объемной активности радона в разных источниках 26 и 78 Бк/л, существует вполне определенная перспектива обнаружения подобных вод в окрестностях Байкальска. В первую очередь она связана с проведением детальных поисковых работ в районе п. Утулик, причем полученное в летний сезон для скважины С1630 значение параметра  $Q$ , согласно установленным для Байкальского региона тенденциям [Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016], должно увеличиться в зимний период. В качестве перспективных могут рассматриваться и другие районы на побережье озера, для которых характерны представленные выше структурные признаки контроля вод с повышенным содержанием радона.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование радоновой активности подземных вод проведено для юго-западного побережья оз. Байкал (участок Култук – Выдрино), геологическое строение которого характеризуется, с одной стороны, сравнительно низким содержанием в породах урана, а с другой – широким распространением разломов, активных на современном этапе формирования Байкальского рифта. Участок Култук – Выдрино принадлежит к юго-западному флангу Южно-Байкальской рифтовой впадины, который представлен зоной крупного дизъюнктива, являющегося юго-восточным сегментом Главного Саянского разлома.

Парагенетический анализ разломов с геологической карты масштаба 1:50000, сети выраженных в рельефе новейших разрывов, а также тектонической трещиноватости в обнажениях горных пород позволил установить, что разрывообразование на участке Култук – Выдрино происходило как минимум в течение трех фанерозойских этапов тектогенеза, характеризующихся разными типами движений в зоне Главного Саянского разлома. На докайнозойских этапах он был взбросом и правым сдвигом, а в кайнозое – трансформационным разломом с двойственной (левосдвиговой и сбросовой) кинематикой, способствующей динамике раскрытия Южно-Байкальской рифтовой котловины. В итоге на узком (5–10 км) береговом участке Култук – Выдрино, принадлежащем к юго-западному крылу

зоны Главного Саянского разлома, сформировалась сеть разрывов, пространственное распределение которых образует продольную цепочку крупных максимумов плотности. Сеть представлена шестью системами разломов, роль которых в структурообразовании каждого этапа была различной. Выделяются северо-западные, север-северо-восточные и субмеридиональные разломы, структура которых наиболее проницаема для воды и газов, поскольку формировалась при активизации на трех этапах тектогенеза и при всех возможных типах подвижек – взбросовых, сдвиговых и сбросовых.

Для берегового участка, протягивающегося от п. Култук до п. Выдрино, впервые в массовом количестве сделаны единичные, а в 11 пунктах – повторяющиеся в течение года оценки содержания радона ( $Q$ ) в 93 водопрооявлениях: скважинах, колодцах, родниках, истоках ручьев, озерах и пр. Этот массив данных был проанализирован на предмет влияния, которое оказывают на величину  $Q$  факторы неструктурной природы: разновидность изучаемых вод (подземные, поверхностные), время пробоотбора (сезоны года), температура воды, глубина пробоотбора и тип скальной горной породы, к выходам которой приурочен водопункт (граниты, диориты, метаморфиты). В итоге для исследования роли разломной структуры в формировании вод с повышенным содержанием радона была создана сравнительно однородная выборка водопрооявлений, на которые перечисленные характеристики не оказывают явно выраженного влияния. Представленные ниже выводы сформулированы на основе анализа 73 оценок параметра  $Q$ , полученных в летний период для проявлений подземных вод, которыми в пределах изученного участка были скважины, колодцы и родники.

На примере сопоставления эманационных и структурных данных для участка Култук – Выдрино установлено, что в геодинамически активных регионах с типовой геохимической обстановкой по содержанию урана структурный фактор играет главную роль в распределении подземных вод с повышенной концентрацией радона ( $Q > 15$  Бк/л). Для зоны Главного Саянского разлома, представляющей юго-западный фланг Южно-Байкальской рифтовой впадины, структурный контроль подобных вод обусловлен местами высокой плотности разрывов и отчетливо проявляется на трех уровнях иерархии. Во-первых, это участки осложнения внутренней структуры зоны 1-го порядка, которые располагаются вдоль ее простираения в виде цепочки максимумов повышенной нарушенности, связанных с перемычками между крупными разломами северо-западного простираения или узлами их пересечения с поперечными разрывами. Во-вторых, это зоны северо-западных, север-северо-вос-

точных и субмеридиональных разрывов 2-го порядка, отличающиеся наиболее развитой внутренней структурой вследствие активизации в разнотипных динамических обстановках (сжатие, растяжение, сдвиг). В-третьих, это узлы сочленения и пересечения разломов перечисленных выше систем, которые отличаются наиболее высокой нарушенностью горных пород.

На третьем уровне иерархии появление в зонах разломов 2-го порядка водопунктов с повышенным содержанием радона, кроме наличия разрывных узлов, может быть связано с локальным понижением температуры подземных вод. Оба фактора приводят к увеличению величины  $Q$ , причем первый – вследствие интенсивной раздробленности субстрата, а второй – из-за повышенной растворимости радиоактивного газа в более холодных водах. Для рассматриваемой территории такое увеличение происходит более чем в полтора раза и достигает десятков беккерелей на литр, что открывает возможность поиска вод, пригодных для использования в лечебных целях. При положительном результате подобных работ туристско-рекреацион-

ный потенциал юго-западного побережья оз. Байкал существенно расширится, что особенно важно для окрестностей г. Байкальска, где недавно было закрыто градообразующее предприятие – целлюлозно-бумажный комбинат.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны докторам геол.-мин. наук С.В. Рассказову и О.В. Луниной, кандидатам геол.-мин. наук И.А. Потехиной и А.В. Черемных, ведущему инженеру А.С. Черемных, аспирантке Е.А. Михеевой и другим сотрудникам Института земной коры СО РАН за помощь в сборе полевого фактического материала и советы, высказанные в ходе подготовки статьи к печати. Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

## 7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agarwal M., Gupta S.K., Deshpande R.D., Yadava M.G., 2006. Helium, radon and radiocarbon studies on a regional aquifer system of the North Gujarat-Cambay region, India. *Chemical Geology* 228 (4), 209–232. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.10.007>.
- Aleksandrov V.K., Taskin A.P., 1990. Regional strike-slip faults in East Siberia, and the dynamics of their formation. *Geotektonika (Geotectonics)* (3), 50–58 (in Russian) [Александров В.К., Таскин А.П. Региональные сдвиги Восточной Сибири и динамика их формирования // *Геотектоника*. 1990. № 3. С. 50–58].
- Baikal Branch of the Geophysical Survey, 2017. The main catalogue of events. Available from: <http://seis-bykl.ru> (last accessed February 10, 2016) (in Russian) [Байкальский филиал геофизической службы. Основной каталог событий. Режим доступа: <http://seis-bykl.ru> (дата обращения: 10.02.2017)].
- Balla Z., Kuzmin M., Levi K., 1991. Kinematics of the Baikal opening: results of modeling. *Annales Tectonicae* 5 (1), 18–31.
- Berzin N.A., 1967. Zone of the Main Fault in the Eastern Sayan. Nauka, Moscow, 147 p. (in Russian) [Берзин Н.А. Зона Главного разлома Восточного Саяна. М.: Наука, 1967. 147 с.].
- CAMERA-01 Measuring Equipment Set for Radon Monitoring, 2003. Manual. NITON, Moscow, 24 p. (in Russian) [Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01». Руководство по эксплуатации. М.: НИТОН, 2003. 24 с.].
- Erdogan M., Eren N., Demirel S., Zedef V., 2013. Determination of radon concentration levels in wellwater in Konya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry* 156 (4), 489–494. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct099>.
- Golenetsky S.I., Misharina L.A., 1978. Seismicity and earthquake focal mechanisms in the Baikal rift zone. *Tectonophysics* 45 (1), 71–85. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90225-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(78)90225-1).
- Guerra M., Etiope G., 1999. Effects of gas-water partitioning, stripping and channelling processes on radon and helium gas distribution in fault areas. *Geochemical Journal* 33 (3), 141–151. <https://doi.org/10.2343/geochemj.33.141>.
- Lamakin V.V., 1968. Neotectonics of the Baikal Basin. Nauka, Moscow, 247 p. (in Russian) [Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с.].
- Levi K.G., Zadonina N.V., Yazev S.A., Voronin V.I., 2012. Modern Geodynamics and Heliogeodynamics. Publishing House of the Irkutsk State University, Irkutsk, 539 p. (in Russian) [Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А., Воронин В.И. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 539 с.].
- Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., Sankov V.A., 1997. Modern geodynamics of the Baikal rift. *Razvedka i Okhrana Nedr (Prospect and Protection of Mineral Resources)* (1), 10–20 (in Russian) [Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лихнев А.В., Мирош-

- ниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А. Современная геодинамика Байкальского рифта // *Разведка и охрана недр*. 1997. № 1. С. 10–20].
- Logachev N.A., 2003. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (5), 391–406.
- Logachev N.A., Florensov N.A., 1977. Baikal system of rift valleys. In: N.A. Florensov (Ed.), Role of rifting in the geological history of the Earth. Nauka, Novosibirsk, p. 19–29 (in Russian) [Логачев Н.А., Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / Ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 19–29].
- Lomonosov I.S., Kustov Yu.I., Pinneker E.V., 1977. Mineral Waters of Pribaikalie. East Siberian Publishing House, Irkutsk, 224 p. (in Russian) [Ломоносов И.С., Кустов Ю.И., Пиннекер Е.В. Минеральные воды Прибайкалья. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1977. 224 с.].
- Malakootian M., Khashi Z., Iranmanesh F., Rahimi M., 2014. Radon concentration in drinking water in villages nearby Rafsanjan fault and evaluation the annual effective dose. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 302 (3), 1167–1176. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3345-1>.
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal region over the period 1991–1996. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (11), 1598–1607.
- Myasnikov A.A., Samovich D.A., Kokarev A.A., Gavrilov L.P., 2009. Uranium-bearing capacity and radiation-ecological situation in the southern regions of East Siberia. In: Radioactivity and Radioactive Elements in Human Environment. Proceedings of the 3rd International Conference (June 23–27, 2009, Tomsk). STT, Tomsk, p. 398–403 (in Russian) [Мясников А.А., Самович Д.А., Кокарев А.А., Гаврилов Л.П. Ураноносность и радиационно-экологическая обстановка территории юга Восточной Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы III Международной конференции (23–27 июня 2009 г., г. Томск). Томск: STT, 2009. С. 398–403].
- Radziminovich N.A., 2010. Focal depths of earthquakes in the Baikal region: a review. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (3), 216–229. <https://doi.org/10.1134/S1069351310030043>.
- 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.
- Schubert M., Paschke A., Lieberman E., Burnett W.C., 2012. Air-Water partitioning of  $^{222}\text{Rn}$  and its dependence on water temperature and salinity. *Environmental Science & Technology* 46 (7), 3905–3911. <https://doi.org/10.1021/es204680n>.
- Seminsky K.Zh., 2003. The Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO Branch, Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 243 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 243 с.].
- Seminsky K.Zh., 2009. Major factors of the evolution of basins and faults in the Baikal rift zone: Tectonophysical analysis. *Geotectonics* 43 (6), 486–500. <https://doi.org/10.1134/S001685210906003X>.
- Seminsky K.Zh., 2012. Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (3), 183–194. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0070>.
- Seminsky K.Zh., 2014. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.
- Seminsky K.Zh., 2015. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: Main stages and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.
- Seminsky K.Zh., Seminsky A.K., 2016. Radon in groundwaters in the Baikal region and Transbaikalia: variations in space and time. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (3), 477–493 (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский А.К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 477–493]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0218>.
- Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016. Special Mapping of the Crustal Fault Zones, and Its Possibilities in Studying the Structural Control of Kimberlites in the Alakit-Markha Field, Yakutian Diamond Province. Publishing house of the Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 204 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.].
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].
- Sherman S.I., Dem'yanovich V.M., Lysak S.V., 2004. Active faults, seismicity and fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system. *Tectonophysics* 380 (3–4), 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.023>.

- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Stress Fields of the Earth's Crust and Geological and Structural Methods of Their Study. Siberian Branch, Nauka, Novosibirsk, 158 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука. СО, 1989. 158 с.].
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A., 1991. Faulting in the Lithosphere. Shear Zones. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, 261 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука. СО, 1991. 261 с.].
- Sim L.A., 1991. The study of tectonic stresses from geological indicators (methods, results, and recommendations). *Izvestia vuzov. Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration)* (10), 3–22 (in Russian) [Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22].
- Soloviev S.L., Kovochev S.A., Misharina L.A., Ufimtsev G.F., 1989. Seismicity of transverse faults in the Olkhon – Svyatoy Nos zone of Lake Baikal. *Doklady AN SSSR* 309 (1), 61–64 (in Russian) [Соловьев С.Л., Ковочев С.А., Мишарина Л.А., Уфимцев Г.Ф. Сейсмичность поперечных нарушений в Ольхон-Святоносской зоне оз. Байкал // Доклады АН СССР. 1989. Т. 309. № 1. С. 61–64].
- Steinitz G., Vulkan U., Lang B., Gilat A., Zafrir H., 1992. Radon emanation along border faults of the rift in the Dead Sea area. *Israel Journal of Earth Sciences* 41 (1), 9–20.
- Suvorov A.I. (Ed.), 1977. Faults and Horizontal Movements in the Mountain Structures of the USSR. Nauka, Moscow, 136 p. (in Russian) [Разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР / Ред. А.И. Суворов. М.: Наука, 1977. 136 с.].
- Vlasov O.N., Tkachuk V.G., Tolstikhin N.I. (Eds.), 1962. Mineral Waters in the Southern Regions of East Siberia. Publishing House of the USSR Acad. Sci., Moscow, Leningrad, vol. 2, 220 p. (in Russian) [Минеральные воды южной части Восточной Сибири / Ред. Н.А. Власов, В.Г. Ткачук, Н.И. Толстихин. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 2. 220 с.].



**Семинский Константин Жанович**, докт. геол.-мин. наук, заместитель директора  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Иркутский научный центр СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия  
Тел.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: [seminsky@crust.irk.ru](mailto:seminsky@crust.irk.ru)

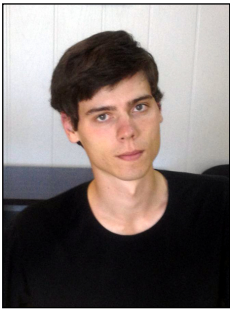
**Seminsky, Konstantin Zh.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Deputy Director  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of RAS  
134 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Tel.: 8(3952)423027; ✉ e-mail: [seminsky@crust.irk.ru](mailto:seminsky@crust.irk.ru)



**Бурзунова Юлия Петровна**, канд. геол.-мин. наук, ведущий инженер  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
e-mail: [burzunova@crust.irk.ru](mailto:burzunova@crust.irk.ru)

**Burzunova, Yulia P.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Engineer  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
e-mail: [burzunova@crust.irk.ru](mailto:burzunova@crust.irk.ru)





**Семинский Александр Константинович**, аспирант  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
e-mail: [zzzsancheszzz@gmail.com](mailto:zzzsancheszzz@gmail.com)

**Seminsky Alexander K.**, Postgraduate Student  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
e-mail: [zzzsancheszzz@gmail.com](mailto:zzzsancheszzz@gmail.com)



**Бобров Александр Анатольевич**, канд. геол.-мин. наук, н.с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Тел.: 89086603375; e-mail: [alexbob@crust.irk.ru](mailto:alexbob@crust.irk.ru)

**Bobrov, Alexander A.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Tel.: 89086603375; e-mail: [alexbob@crust.irk.ru](mailto:alexbob@crust.irk.ru)