

УДК 550.837:550.370:550.375:551.594

**ПРОГНОЗ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОЦЕНКА
СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИЙ С АКТИВНОЙ ТЕКТОНИКОЙ****Татаркин А.В.***ООО НИПППД «Недра», Пермь, e-mail: vsto08@mail.ru*

Интенсивная жизнедеятельность человека, затрагивающая освоение территорий с активной сейсмотектоникой, неразрывно связана с катастрофическими явлениями природного характера. Для уменьшения последствий чрезвычайных ситуаций требуется совершенствование систем своевременного прогноза и оценки степени опасности изменений инженерно-геологических условий для существующих зданий и сооружений. В статье приведено обоснование методики прогноза колебаний земной поверхности для оценки степени опасности изменений инженерно-геологических условий. Для этого использованы результаты исследований на Алтайском сейсмологическом полигоне в 2003–2005 гг. до и после активной фазы Чуйского (Алтайского) землетрясения. Натурные измерения выполнены комплексом методов электротометрии, состоящим из высокоточных мониторинговых измерений удельного электрического сопротивления и естественных переменных электромагнитных полей. Регистрация данных синхронизировалась по времени с сейсмологическими наблюдениями, проводившимися на данном участке. По результатам исследований выявлены закономерности отображения аномальных проявлений напряженности электрического поля и определены критерии, связанные с влиянием тектонических процессов. Рассмотрены две модели, поясняющие «подготовку» землетрясения. С учетом физико-геологических изменений и анализа публикаций отдано предпочтение связи землетрясений с атмосферным электричеством и инициирующим его радоном. В зависимости от периода атмосферных возмущений, величины изменения сопротивления и коэффициента анизотропии приводится степень опасности изменений инженерно-геологических условий в результате деформаций земной поверхности. На основании выделенных критериев и опыта проведенных исследований на подработанных территориях разработана методика прогноза колебаний земной поверхности территорий с активной тектоникой для оценки изменений инженерно-геологических условий.

Ключевые слова: инженерная геология, инженерно-геологические условия, сейсмическая активность, электротометрия, оценка рисков, прогноз, землетрясения

**FORECAST OF GROUND SURFACE VIBRATIONS AND EVALUATION
OF THE DEPTH OF RISK OF CHANGES IN ENGINEERING
AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF TERRITORIES WITH ACTIVE TECTONICS****Tatarkin A.V.***NIPPD «NEDRA» LLC, Perm, e-mail: vsto08@mail.ru*

Intensive human activity, affecting the development of areas with active seismotectonics is inextricably linked with catastrophic natural phenomena. To reduce the consequences of emergency situations, it is necessary to improve the systems for timely forecasting and assessing the degree of danger of changes in engineering geological conditions for existing buildings and structures. The article presents the justification of the methodology for predicting earth surface oscillations to assess the degree of danger of changes in engineering geological conditions. For this purpose, the results of research at the Altai seismological testing site in the period 2003–2005 were used, before and after the active phase of the Chuisky (Altai) earthquake. Field measurements are performed by a set of electrometry methods, consisting of high-precision monitoring measurements of electrical resistivity and natural variable electromagnetic fields. Data logging was synchronized in time with seismological observations conducted at this site. According to the results of the research, regularities of the display of the anomalous manifestations of the electric field intensity were revealed and the criteria associated with the influence of tectonic processes were determined. Considered two models explaining the «preparation» of the earthquake. Taking into account physical and geological changes and analysis of publications, a preference has been made towards the connection of earthquakes with atmospheric electricity and radon initiating it. Depending on the period of atmospheric disturbances, the magnitude of the change in resistance and the anisotropy coefficient, the degree of danger of changes in engineering-geological conditions as a result of deformations of the earth's surface is given. On the basis of the selected criteria and the experience of the studies carried out in the undermined territories, a method for predicting earth surface fluctuations of areas with active tectonics has been developed to assess changes in engineering and geological conditions.

Keywords: engineering geology, geotechnical conditions, seismic activity, electrometry, risk assessment, forecast, earthquakes

Вопросы прогноза негативных геологических процессов и оценки изменений инженерно-геологических условий являются весьма актуальными в жизнедеятельности человека. Особенно остро эти вопросы стоят при современном освоении сейсмоактивных территорий, сопровождающихся промышленной и городской застройкой. В данном

случае для безопасной эксплуатации зданий и сооружений важна информация об инженерно-геологических условиях (ИГУ) и оценки их изменений. Как правило, оценка ИГУ выполняется в рамках изысканий [1], но при этом прогноз изменений неразрывно связан со степенью опасности возникновения землетрясений, что требует их предупреждения.

С середины прошлого века в мире ведутся активные исследования в поисках критериев, предсказывающих землетрясения. Среди них выделяются: изменение уровня подземных вод, вариации физических свойств глубинной части разреза, увеличение форшоковых событий, цикличность землетрясений, электромагнитные явления. Современная концепция исследования зон активных разломов основывается на комплексном анализе информации, полученной разными методами. Один из подходов к решению вопросов прогноза колебаний земной поверхности, связанных с природными землетрясениями, является использование методов электротметрии. Перспективы использования данных методов обусловлены физическими процессами, происходящими как в земной коре, так и в атмосферных слоях Земли. В частности, определению активных зон и их мониторингу способствует большой диапазон изменения электрического сопротивления и его зависимость от влажности, минерализации, пористости и др. В то же время предпосылками прогноза землетрясений являются электромагнитные явления и вариации электрических свойств, сопровождающие процесс «подготовки» землетрясений [2].

Цель исследования: разработка методики прогноза колебаний земной поверхности для оценки степени опасности изменений инженерно-геологических условий для сейсмоактивных территорий.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов использованы натурные наблюдения на участке, располо-

женном в 17 км северо-восточнее п. Акташ вблизи предполагаемого эпицентра землетрясения и тектонического нарушения. Работы охватывали период времени, непосредственно предшествующий Чуйскому (Алтайскому) землетрясению (август 2003 г.), активную его фазу (ноябрь 2003 г.), а также последующий период, сопровождавшийся большим количеством афтершоков (август 2004 г. и август 2005 г.) [3].

Комплекс методов исследований включал мониторинговые измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и высокоточные мониторинговые векторные измерения естественных переменных электромагнитных полей и удельного электрического сопротивления. Данные наблюдений имели синхронизацию по времени с расположенной на этом же участке сейсмологической станцией [3].

Суть методики высокоточных мониторинговых измерений заключалась в использовании стационарных многоканальных площадных установок с контролируемым или неконтролируемым источниками электромагнитного поля (рис. 1). Высокая точность мониторинга достигается за счет снижения влияния приповерхностных условий (неоднородностей, рельеф) и повышение точности съемки за счет единообразия повторных площадных измерений.

Результатами измерений являются пространственно-временные параметры электромагнитных полей и электрического сопротивления, характеризующие физическое состояние геологической среды и его изменение.

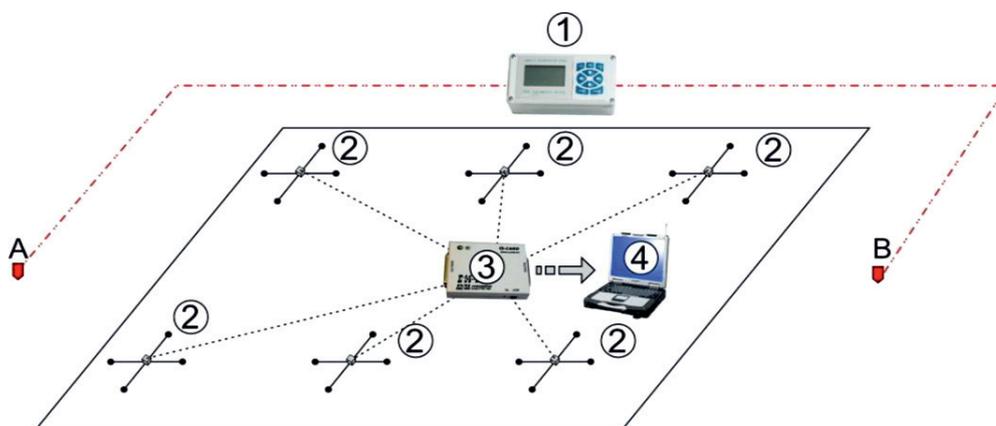


Рис. 1. Схема высокоточного мониторинга электрического сопротивления и электромагнитных полей
1 – генераторная установка, 2 – модуль регистрации, 3 – модуль сбора и обработки информации

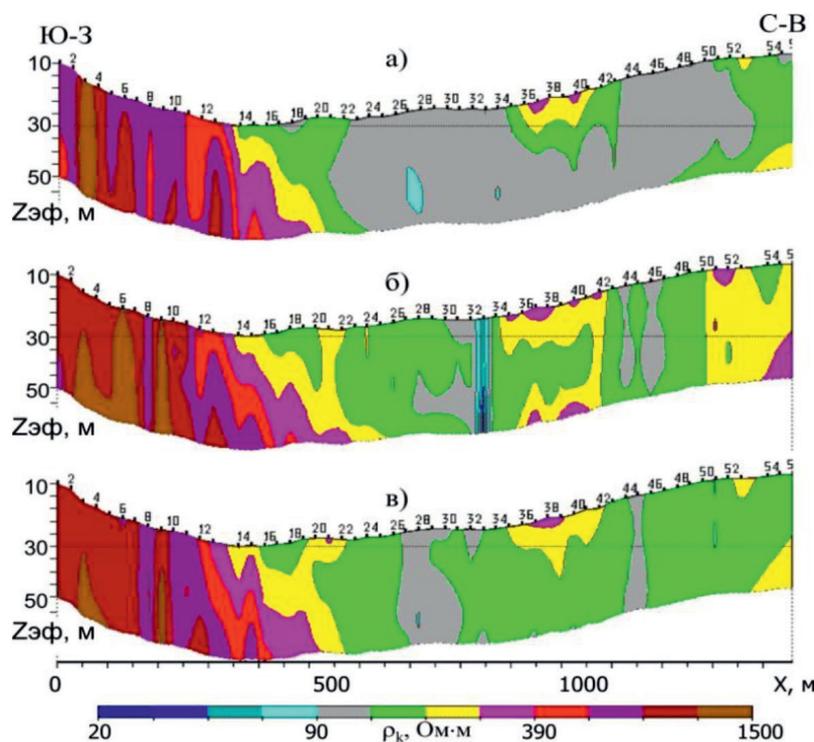


Рис. 2. Разрезы кажущегося сопротивления, полученные до (а) и после (б, в) активной фазы землетрясения (а – август 2003 г., б – август 2004 г., в – август 2005 г.)

Результаты исследования и их обсуждение

Чуйское (Алтайское) землетрясение произошло 27 сентября 2003 г. Его очаг находился на юго-западной окраине Чуйского и Курайского артезианских бассейнов, а величина магнитуды составила 7,3 балла. Строение бассейнов характеризуется наличием многолетнемерзлых пород (ММП) мощность которых на севере-востоке от очага достигает 70 м [4]. С точки зрения тектоники землетрясение приурочено к сопряжению двух разломов Чарышско-Теректинского и Северо-Чуйского [5]. Где в зонах сочленения хребтов и внутригорных впадин максимальные амплитуды вертикальных движений составляют 1–4 тыс. м [6].

По результатам измерений методом ВЭЗ, выполненных в крест предполагаемого тектонического нарушения, была получена первоначальная модель объекта исследований и определены границы тектонического нарушения. На рис. 2, а, представлен разрез кажущихся сопротивлений, полученный в августе 2003 г. до активной фазы землетрясения. По результатам иссле-

дований выделяются две зоны, разделенные осью тектонического нарушения – юго-западная относительно повышенного сопротивления и северо-восточная пониженных значений.

Для извлечения информации о глубинной части разреза, захватывающей предполагаемую очаговую область землетрясений, и построения цифровой модели были использованы наблюдения естественного электромагнитного поля. По измерениям напряженности электрического и магнитного полей была выделена регулярная часть магнитотеллурического поля и выполнена интерпретация кривой зондирования. В результате количественной интерпретации получена цифровая модель, которая показывает наличие слоя относительно низких электрических сопротивлений в интервале глубин 2,5–14 км. Именно данный слой предположительно связан с активизацией тектонических процессов.

Выделенная зона тектонического нарушения по совокупности полученных признаков была отнесена к участку с повышенным риском возникновения чрезвычайных ситуаций, где и был организован

дальнейший мониторинг естественных электромагнитных полей по вышеописанной схеме (рис. 1). Один из примеров регистрации естественного электромагнитного поля представлен на рис. 3. Анализ мониторинговых наблюдений выявил несколько видов импульсов с различными характеристиками (рис. 3, а). Амплитудно-частотные характеристики сигналов, представленные на рис. 3, б, указывают на то, что наибольшие значения амплитуд (выделенной энергии) отмечаются в диапазоне сверхнизких частот (0,04–10 Гц) и в высокочастотном (10–25 кГц) диапазонах. При этом фаза аномальной интенсивности электромагнитного поля перед землетрясением сопровождается фазой затихия длительностью 2–3 ч.

Гистограммы распределения количества импульсов от частоты электромагнитного поля показали, что интенсивность излучения меняется в зависимости от стадии тектонической активности. Наибольшая интенсивность наблюдается перед основным землетрясением в диапазоне частот 0,04–2 Гц и 7000–9000 Гц. Кроме того, отмечается увеличение уровня фона во всем диапазоне частот до 25 кГц и небольшое повышение количества импульсов в диапазоне 4–8 Гц.

При этом изменения интенсивности электромагнитного поля в период подготовки землетрясения можно рассматривать с двух позиций. Первая связана с процессом трещинообразования при изменении

напряжений, когда сначала формируются мелкие трещины (высокие частоты) и далее крупные (низкие частоты поля). В данной ситуации разрушение горных может сопровождаться пьезоэлектрическим эффектом и перераспределением зарядов. Вторая позиция может быть обусловлена изменением концентрации и освобождением радона или других газов в период «подготовки» сейсмического события. Как известно, этот период может достигать до 100 дней перед землетрясением [7]. Высвобождение радона влияет на состояние атмосферы и участвует в перераспределении зарядов, вследствие чего может увеличиваться интенсивность и частота электрических разрядов (рис. 4). В то же время генерация электромагнитного поля и его взаимодействие может происходить на различных уровнях – от земного до атмосферного. Но именно освобождение радона, по мнению автора, оказывает наибольшее влияние на процессы, связанные с атмосферным электричеством (атмосфериками) и их активностью в модели сейсмоактивных зон. При этом эффекты могут наблюдаться и на некотором расстоянии от эпицентра землетрясения, благодаря атмосферному волноводу и тектоническим нарушениям. Опубликованные результаты исследований других авторов также свидетельствуют о перспективах использования атмосфериков при прогнозе землетрясений [8].

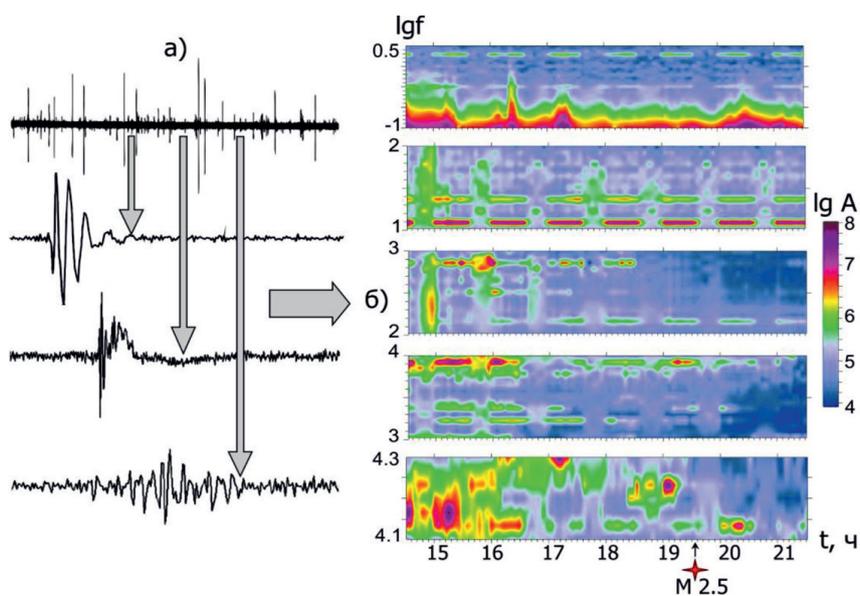


Рис. 3. Виды сигналов в высокочастотном диапазоне (а) и спектрограммы напряженности электрического поля в диапазоне частот до 25 кГц в период сейсмического события с магнитудой 2,5 (б)

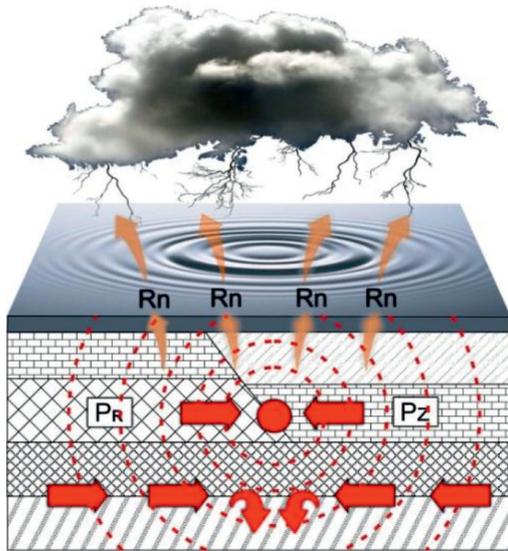


Рис. 4. Модель процесса «подготовки» землетрясения

Важным аспектом прогноза колебаний земной поверхности является контроль выделенных зон с повышенным риском возникновения чрезвычайных ситуаций. В данном случае очень важен прогноз изменения физического состояния горных пород и оценка инженерно-геологических условий геологической среды. Для этой цели использован метод высокоточного мониторинга сопротивления на квазипостоянном токе и в варианте магнитотеллурического зондирования. Кроме того, были выполнены повторные наблюдения методом ВЭЗ в крест тектонического нарушения. Предпосылками использования электрического сопротивления в мониторинговых наблюдениях являются высокая чувствительность сопротивления к изменениям физического состояния горных пород: степени их трещиноватости, пористости, газо-, водонасыщенности, минерализации водных растворов и др.

Мониторинговые измерения верхней части разреза с использованием вертикального электрического зондирования показывают изменения в результатах, полученных на различных стадиях землетрясения (рис. 2). Изменения отображаются в увеличении дифференциации и значений кажущегося сопротивления в восточной части примерно на 30% после землетрясения.

Это может быть связано с нарушением физико-механических свойств среды и условий залегания, включая подземные воды. При этом через два года после основного события отмечается стабилизация свойств зоны нарушения вследствие её залечивания.

Для осуществления высокоточных мониторинговых наблюдений за изменением электрических свойств среды в верхней ее части до глубины порядка 100 была развернута сеть высокоточных наблюдений с контролируемым источником квазипостоянного тока (рис. 1), охватывающим зону тектонического нарушения.

В ходе площадного мониторинга получено пространственно-временное распределение электрического сопротивления пород в районе сейсмической активности, которое характеризует наибольшие области изменений геологической среды. Результаты измерений в качестве примера отображены в виде графиков кажущегося сопротивления по двум направлениям за период наблюдений, равный восьми часам (рис. 5). Как мы видим, электрическое сопротивление закономерно меняется в противофазе во времени, что указывает на наличие анизотропных процессов в области активного разлома. Вместе с тем максимальное отклонение сопротивления достигает 12% и указывает на изменения инженерно-геологических условий.

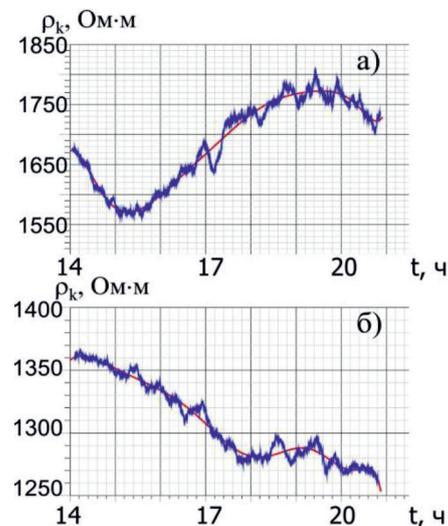


Рис. 5. Динамика кажущегося сопротивления по двум компонентам

Кроме того, прогноз изменений ИГУ может быть оценен с позиций процессов, происходящих на глубине очага землетрясений. Для этого была выполнена оценка изменения электрического сопротивления по данным высокоточного мониторинга методом магнитотеллурического зондирования. Полученные результаты показывают вариации свойств опорного горизонта и проводящего слоя связанного с очагом тектонической активности.

Оценка степени опасности изменений ИГУ в зонах с активной тектоникой

Критерии оценки изменений ИГУ			Оценка степени опасности изменений ИГУ	
период атмосферных возмущений, t, ч	суточные изменения УЭС, %	коэффициент анизотропии, ед.	степень опасности	зона изменений, км
<1	1–3	<1.1	Низкая, < 25%	<10
1–3	3–7	1.2–1.3	Средняя, 25–75%	10–30
>3	7–10	>1.3	Высокая, > 75%	> 30

С учетом описанных выше результатов и опыта исследований [3, 9] предлагается методика прогноза колебаний земной поверхности в зонах активной тектоники. Основу методики составляют следующие элементы:

- формирование модели «геологическая среда – сооружение» для выявления зон с повышенным риском возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- разработка цифровой модели зон с повышенным риском;
- мониторинг зон с повышенным риском возникновения чрезвычайных ситуаций;
- оценка рисков изменений инженерно-геологических условий системы «геологическая среда – сооружение».

Исходя из полученных выше закономерностей в ходе проведенных исследований, могут быть сформулированы критерии для оценки степени опасности изменений инженерно-геологических условий в результате деформации земной поверхности в зонах активной тектоники, представленные в таблице.

Заключение

Основные научные и практические результаты выполненных исследований сводятся к следующему:

- анализ мониторинговых наблюдений естественного электромагнитного поля позволил выявить закономерности предшествующие сейсмическому событию;
- предложена модель процессов, сопровождающих «подготовку» землетрясений;
- на основании закономерностей изменений естественных электромагнитных полей и электрического сопротивления, предшествующих сейсмическому событию, разработана методика прогноза колебаний земной поверхности и оценки степени изменений ИГУ;
- сформулированы критерии для оценки степени опасности изменений инженерно-геологических условий;

– разработанная методика рекомендует для апробации в сейсмоактивных зонах.

Автор выражает благодарность Р.А. Дягилеву, профессору В.П. Колесникову за участие и помощь в проведенных исследованиях.

Список литературы / References

1. Колесников В.П., Пригара А.М., Татаркин А.В., Филimonчиков А.А. Инженерно-геофизические исследования в условиях подработанных территорий // Инженерные изыскания. 2012. № 9. С. 25–32.

Kolesnikov V.P., Prigara A.M., Tatarikin A.V., Filimonchikov A.A. Engineering-geophysical investigations under conditions of undermined areas // Engineering surveys. 2012. № 9. P. 25–32 (in Russian).

2. Аксенов В.В. Математическое моделирование предвестников землетрясений, возникающих в физических полях // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 3. С. 36–44.

Aksenov V.V. Mathematical modeling of earthquake precursors occurring in physical fields // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh zavedeniy. Geologiya i Razvedka. 2016. № 3. P. 36–44 (in Russian).

3. Татаркин А.В., Колесников В.П., Малиновский К.К. В поисках электромагнитных предвестников землетрясений // Горное Эхо. 2005. № 4 (22). С. 12–18.

Tatarikin A.V., Kolesnikov V.P., Malinovsky K.K. In search of electromagnetic precursors of earthquakes // Gornoye Ekho. 2005. № 4 (22). P. 12–18 (in Russian).

4. Кац В.Е., Робертус Ю.В. Гидрогеологические особенности в эпицентральной части Чуйского землетрясения // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Материалы научно-практической конференции. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2004. С. 99–101.

Katz V.E., Robertus Yu.V. Hydrogeological features in the epicentral part of the Chui earthquake // Altai (Chui) earthquake: predictions, characteristics, consequences. Materials of the scientific-practical conference. Gorno-Altai: RIO GAGU, 2004. P. 99–101 (in Russian).

5. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая / Науч. ред. Е.В. Девяткин, Г.Ф. Уфимцев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. 313 с.

Novikov I.S. Morphotectonics of Altai. Nauch / Ed. E.V. Devyatkin, G.F. Ufimtsev. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial «Geo», 2004. 313 p. (in Russian)

6. Деев Е.В. Первичные палеосейсмодислокации сильных позднеголоценовых землетрясений в зоне сочленения Чуйской внутригорной впадины и Курайского хребта (Горный Алтай) // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 403–409.

Deev E.V. Primary paleoseismic dislocations of strong Late Holocene earthquakes in the junction zone of the Chui

intramonal basin and the Kurai Range (Gorny Altai) // Fourth tectonophysical conference at the Institute of Physics and Physics of the Russian Academy of Sciences «Tectonophysics and Current Issues of Earth Sciences» Materials reports of the All-Russian Conference with international participation. Т. 1. М.: IFZ RAN, 2016. P. 403–409 (in Russian).

7. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277–286.

Utkin V.I., Yurkov A.K. Radon as a tracer of tectonic movements // Russian Geology and Geophysics. 2010. V. 51. № 2. P. 220–227. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.12.022.

8. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A. Electrodynamical properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmospheric Research. 2017. Vol. 194. P. 119–129. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.04.012.

9. Филимончиков А.А., Татаркин А.В. Оценка рисков изменений геотехнических условий на подработанных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 4. С. 123–128.

Filimonchikov A.A., Tatarkin A.V. Risk Evaluation of Geotechnical Conditions Changes on Underworked Areas // Mining information and analytical bulletin. 2014. № 4. P. 123–128 (in Russian).