

УДК 556.3+550.34

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА И В УЗБЕКИСТАНЕ)

Копылова Г.Н.¹, Юсунов Ш.С.², Серафимова Ю.К.¹, Шин Л.Ю.²

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, *gala@emsd.ru*

²Институт сейсмологии АН РУз, г.Ташкент, Республика Узбекистан, *shuhrat-1951@mail.ru*

Введение

Аномальные изменения химического состава подземных вод перед сильными землетрясениями, называются гидрогеохимическими предвестниками (далее ГГХП). Полагается, что ГГХП могут использоваться для решения задач сейсмического прогнозирования, в первую очередь, для оценки времени сильных землетрясений.

ГГХП являются одной из составляющих более общего понятия «геохимические предвестники», объединяющего совокупность аномальных изменений химического состава вод и газов поверхностной, подземной гидросферы и атмосферы в процессе подготовки землетрясений. Кроме этого, ГГХП относятся к классу гидрогеологических предвестников, отражающих изменения физико-химических параметров подземных вод вследствие процессов подготовки землетрясений. Для обнаружения ГГХП проводятся наблюдения на самоизливающихся скважинах и источниках за показателями макро-, мезо- и микрокомпонентного состава подземной воды и газов. Газы, содержащиеся в подземных водах, могут находиться в растворенном и в свободном состоянии. Такие особенности ГГХП, как объекта научного исследования, предполагают их изучение на основе комплекса наук о подземной гидросфере (гидрогеологии, гидрогеодинамики, гидрогеохимии), а также наук химического направления, главным образом, аналитической химии, с привлечением сейсмологии, региональной геологии, тектоники и др.

Традиционным методом гидрогеохимических наблюдений является отбор проб воды и газа на самоизливающихся скважинах и источниках с последующим выполнением химического анализа состава воды и газа в лабораторных условиях. Периодичность гидрогеохимических наблюдений составляет от одних до нескольких суток. В результате таких мероприятий формируются временные ряды различных гидрогеохимических показателей, которые анализируются в сопоставлении с сильными землетрясениями. Определенные трудности в выделении ГГХП связаны с влиянием различных природных и техногенных факторов на режим водопроявлений, с условиями пробоотбора, особенностями химического анализа отдельных компонентов состава подземных вод и газа, а также с возможным наложением эффектов динамического воздействия сейсмических волн на ГГХП, и др.

Таким образом, изучение закономерностей проявления ГГХП и процессов их формирования является сложной задачей, решение которой основывается на достоверных данных о ГГХП в режиме подземных вод сейсмоактивных регионов, различающихся геолого-тектоническим строением, сейсмическими и гидрогеологическими условиями. По совокупности данных о ГГХП оценивается связь их проявления с параметрами будущих землетрясений и механизмы формирования в природных водоносных системах и в системах «скважина – водовмещающая порода».

В настоящей работе представлены данные о ГГХП по результатам многолетних наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН на сети скважин и источников на территории Петропавловского геодинамического полигона, Восточная Камчатка [5, 8] и в Узбекистане. Основное внимание уделяется данным наблюдений на источнике Озодбаш, Приташкентский артезианский бассейн [7, 9].

Рассматриваются закономерности проявления ГГХП в связи с сильными землетрясениями и процессы их формирования на основе модели механического смешивания контрастных по химсоставу вод в зонах повышенной водопроницаемости [3, 4, 10–11] и физико-химического анализа взаимодействия в системе «вода – горная порода» [1, 6].

Камчатка

В течение 1977–1992 гг. на территории Петропавловского геодинамического полигона (ПГТ, Восточная часть полуострова Камчатка, см. рис. 2А, Б в [5]) были организованы наблюдения за химическим составом подземных вод на четырех станциях – Пиначево, Морозная, Верхняя

Паратунка и Хлебозавод. При организации наблюдений полагалось, что данные наблюдений должны включать определения основных физико-химических параметров подземных вод – дебитов, температуры, рН, макрокомпонентов и, в отдельных случаях, некоторых мезо- и микрокомпонентов (кремниевой и борной кислот, лития, йода) в составе воды. Набор наблюдаемых гидрогеохимических параметров для каждой скважины и источника определялся индивидуально, с учетом состава воды и возможностей аналитической базы.

С 1992 г. наблюдательная сеть существенно не менялась и включала четыре источника на Пиначевской площади и до семи–десяти самоизливающихся скважин (6 скважин, 2019 г.), вскрывающих на глубинах от 120 м до 2.5 км подземные воды зон активного и замедленного водообмена и термальные азотно-метановые и азотные воды [2, 8, 5]. Наблюдения проводились один раз в три–шесть дней. Производились замеры дебитов, температуры воды; отбирались пробы воды, свободного и растворенного газа, в которых определялся широкий набор компонентов. В результате были получены однородные временные ряды различных физико-химических параметров подземных вод за многолетний период. В их изменениях были обнаружены эффекты воздействия сейсмических волн от местных ощутимых землетрясений, которые проявлялись в увеличении дебитов, повышении температуры и минерализации воды, в изменениях концентраций компонентов химического состава подземной воды и газа.

По данным наблюдений 1977–1997 гг. перед наиболее сильными землетрясениями Камчатки 06.10.1987 г., $M_W = 6.6$; 02.03.1992 г., $M_W = 6.9$; 08.06.1993 г., $M_W = 7.5$; 13.11.1993 г., $M_W = 7.0$; 01.01.1996 г., $M_W = 6.9$; 05.12.1997 г., $M_W = 7.8$ (эпицентральных расстояния $d_e = 90 - 300$ км) были зарегистрированы изменения показателей химического состава воды и газа, выделенные в ГГХП. Заблаговременность их проявления перед землетрясениями составляла от одного до девяти месяцев [2, 5, 8].

На рис. 1 приводится диаграмма распределения ГГХП в зависимости от соотношения величин магнитуды и гипоцентрального расстояния землетрясений. Из нее следует, что ГГХП проявлялись перед землетрясениями с величинами магнитуд $M_W = 6.6 - 7.8$, произошедшими на эпицентральных расстояниях d_e от 90 до 300 км. Обычно, такие землетрясения в районах станций сопровождалось сотрясениями интенсивностью $I = 5 - 6$ баллов по шкале MSK-64. Проявления гидрогеохимических эффектов при воздействии сейсмических волн имеют примерно такую же зависимость от параметров землетрясений, как и для ГГХП. Исключение составляют Пиначевские источники, для которых характерно постсейсмическое повышение дебитов и концентраций макрокомпонентов после ощутимых землетрясений с $M \geq 4.0$ на эпицентральных расстояниях до 450 км, $I \geq 3-4$ балла.

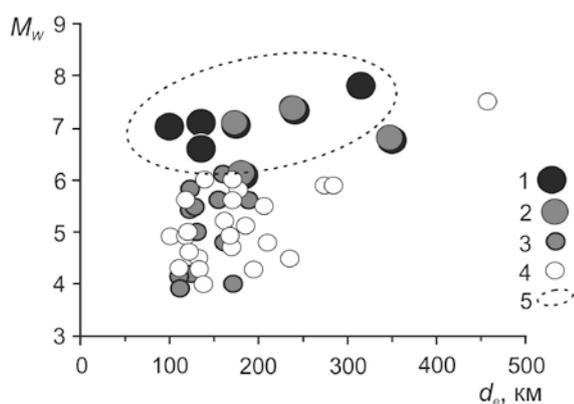


Рис. 1. Проявления различных эффектов в изменениях режима источников и скважин на территории ПГТ в зависимости от величин магнитуды землетрясений M_W и эпицентрального расстояния d_e , км: 1–2 – ГГХП и постсейсмические изменения химического состава воды и газа, дебитов и температуры воды; 3–4 – постсейсмические эффекты: 3 – повышение дебитов и изменение химического состава воды; 4 – повышение дебитов источников; 5 – область параметров M_W и d_e для землетрясений, перед которыми проявлялись ГГХП.

Гидрогеохимические наблюдения в Узбекистане

Изучение ГГХП в изменениях химического состава подземных вод в Узбекистане проводится более 60-ти лет и являются пионерскими в мире, начиная с работы В.И. Уломова и Б.З. Мавашева (1967 г.). Определяющий вклад в изучение ГГХП в Узбекистане внесли сотрудники Института сейсмологии АН РУз академик Султанходжаев А.Н., к.г.-м.н. Зиган Ф.Г. и др. С 90-х гг. XX в. изучение ГГХП проводится под руководством д.г.-м.н. Юсупова Ш.С. с использованием данных гидрогеохимических наблюдений на сети источников и скважин.

Ниже представлены данные наблюдений на источнике Озодбаш в августе 2010 – ноябре 2013 гг. (рис. 2) в период двух сильных землетрясений – Туябугузского 25.05.2013 г., $M = 5.6$, произошедшего на эпицентральных расстоянии $d_e = 70$ км [7], и землетрясения 26.05.2013 г. с $M = 6.2$, $d_e = 200$ км [9].

В изменениях гидрогеохимических параметров, главным образом, в газовом составе, были обнаружены яркие проявления ГГХП в течение примерно девяти месяцев перед землетрясениями 25 и 26 мая 2013 г. Длительности аномалий по различным параметрам, выделенным по превышениям концентраций их фоновых величин за многолетний период, изменялись от 55 до 160 сут при величинах экстремальных значений 150 – 800% [9]. В указанной работе отмечается, что аналогичные изменения параметров подземных вод прослеживались также в других наблюдательных скважинах, вскрывающих подземные воды в верхнемеловых и четвертичных отложениях Приташкентского артезианского бассейна. Это показывает, что на стадии подготовки землетрясений в мае 2013 г. происходили изменения гидрогеохимического режима в пределах всей водоносной толщи бассейна.

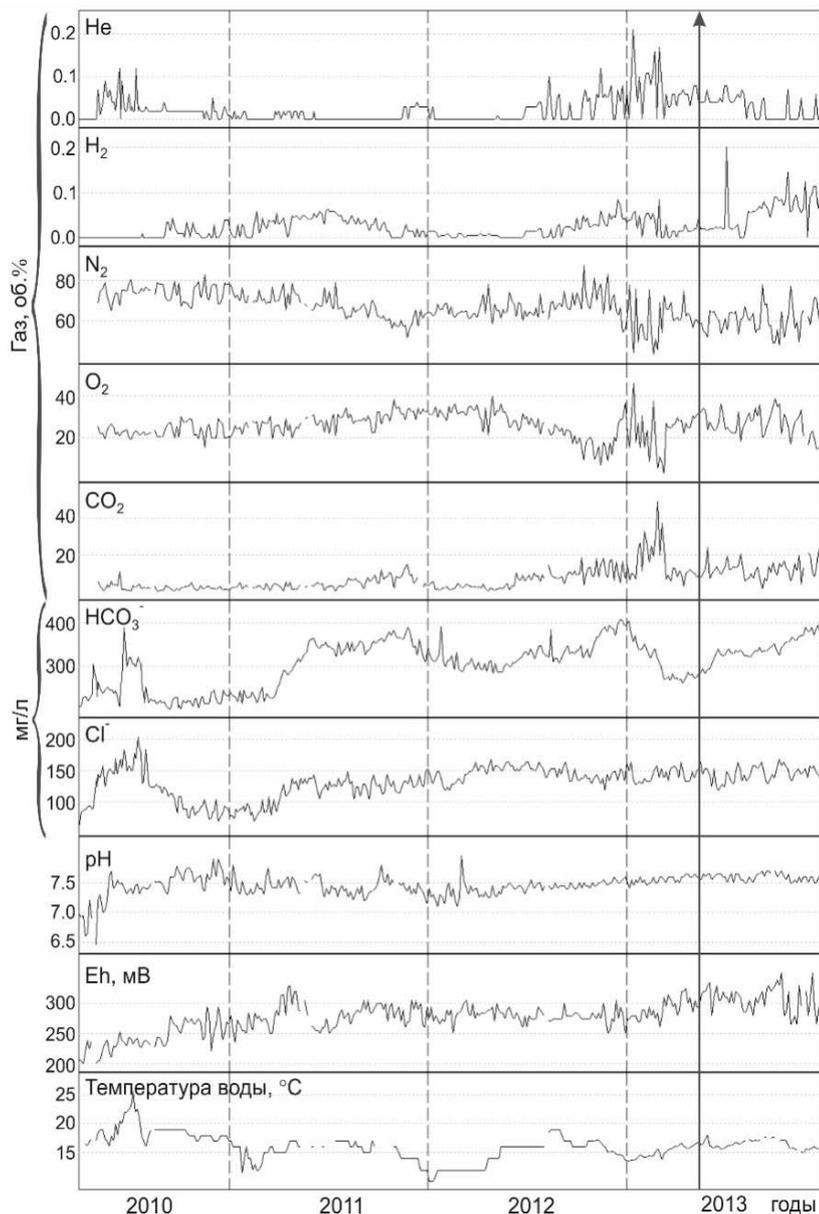


Рис. 2. Изменения гидрогеохимических параметров и температуры воды источника Озодбаш в 2010 – 2013 гг. в период землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. (показаны вертикальной стрелкой).

Источник Озодбаш (координаты 41.54 ° с.ш., 69.63 ° в.д.) расположен на территории Приташкентского артезианского бассейна в пределах разломной зоны. Его разгрузка осуществляется за счет подземных вод из палеозойских отложений. Дебит самоизлива составляет 5 л/мин., температура воды – 17–19 °С, минерализация воды 1.0–0.7 г/л.

Периодичность наблюдений составляла один раз в 2 – 4 суток. Определения концентраций хлора и гидрокарбонат-иона в воде проводились традиционными методами. Состав газа определялся хроматографическим методом. Авторы [9] отмечают, что ГГХП в изменениях газового состава источника Озодбаш связаны с увеличением доли газов He, H₂, CO₂, поступающих из изолированных пор в водовмещающих породах при их деформации в процессе подготовки землетрясений. Кроме этого, увеличение поступления водорода в водоносную систему источника сопровождалось ростом водородного показателя pH от 7.1 до 7.6, нарушением карбонатного

равновесия и изменениями окислительных процессов в подземной воде.

Сейсмотектонические условия районов гидрогеохимических наблюдений на территории Узбекистана рассмотрены в [7]. В этой работе обсуждается возможная связь проявлений ГГХП в скважинах и источниках Приташкентского бассейна перед землетрясениями 25 и 26 мая 2013 г. с разломно-блоковой структурой. При этом отмечается слабая степень изученности этого вопроса.

Отметим, что приведенные данные о ГГХП перед землетрясениями 25 и 26 мая 2013 г. ($M = 5.6 - 6.2$, $d_e = 70 - 200$ км) в целом согласуются с зависимостью проявления ГГХП от соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений, полученной для Камчатки (рис. 1).

Процессы формирования ГГХП

Данные наблюдений ГГХП показывают, что на стадиях подготовки сильных землетрясений происходит перераспределение компонентного состава воды и газа и изменение минерализации воды. Это позволяет полагать, что ведущими процессами формирования ГГХП являются: (1) изменение условий смешивания различных по химсоставу и минерализации вод в зонах повышенной водопроницаемости, которыми могут быть различные геологические объекты – разломные зоны, неоднородности литологического состава водовмещающих пород («гидрогеологические окна»), а также ствол скважины, и (2) изменение физико-химического взаимодействия в системе «вода – горная порода» при деформации водовмещающей породы и развитии в ней трещинной дилатансии [4, 6, 10, 11].

В работе [3], на примере Пиначевского источника 1, и в [4], на примере скважин Морозная 1 (М1) и ГК-1 Пиначевская, показано, что применение математической модели смешивания двух контрастных по минерализации вод в зоне повышенной водопроницаемости [11] позволяет описывать не только эффекты воздействия сейсмических волн в изменениях дебита и концентраций макрокомпонентов в составе подземной воды, но и последовательное проявление ГГХП и постсейсмических изменений в составе растворенных минеральных компонентов. При этом модель водоносной системы принималась в виде среды с двойной пористостью, в которой основной поток низкоминерализованной воды перемещается по взаимосвязанным трещинам. Трещины разделяют слабопроницаемые блоки, в пустотах которых содержится вода с повышенной минерализацией и другим химическим составом.

С использованием моделирования изменений макрокомпонентного состава воды в скв. М1 в период землетрясения 2 марта 1992 г., $M = 6.9$, $d_e = 135$ км были оценены составы смешивающихся вод на стадии формирования ГГХП и характер изменения состава подземной воды в результате воздействия сейсмических волн. Расчеты показали, что в «трещинах» присутствует вода гидрокарбонатно-сульфатного натриево-кальциевого состава с минерализацией 0.14 – 0.17 г/л. Минерализация воды в «блоках» составляет 0.30 – 0.37 г/л, ее состав – сульфатный натриево-кальциевый. ГГХП образовался в результате увеличения доли растворенного вещества из «блоков» в смешанной воде, изливающейся из скважины. В результате сейсмических сотрясений в смешанной воде происходило относительно кратковременное увеличение доли воды из «трещин». При этом наблюдалось относительное, по сравнению с модельным поведением макрокомпонентов на стадии формирования ГГХП, увеличение концентрации гидрокарбонат-иона и уменьшение концентраций сульфат-иона, кальция и натрия (см. рис. 1 в [4]).

Для отдельных наблюдательных источников и скважин также были оценены два управляющих (гидродинамических) параметра модели смешивания: t_0 – время релаксации импульса избыточного давления в водоносной системе, сут и τ_0 – время движения потока смешанной воды в зоне повышенной водопроницаемости, сут. Их величины для камчатских скважин и источников составляли $t_0 = 20 – 120$ сут и $\tau_0 = 50 – 350$ сут для ГГХП и $t_0 = 34 – 90$ сут и $\tau_0 = 35 – 200$ сут для постсейсмических эффектов.

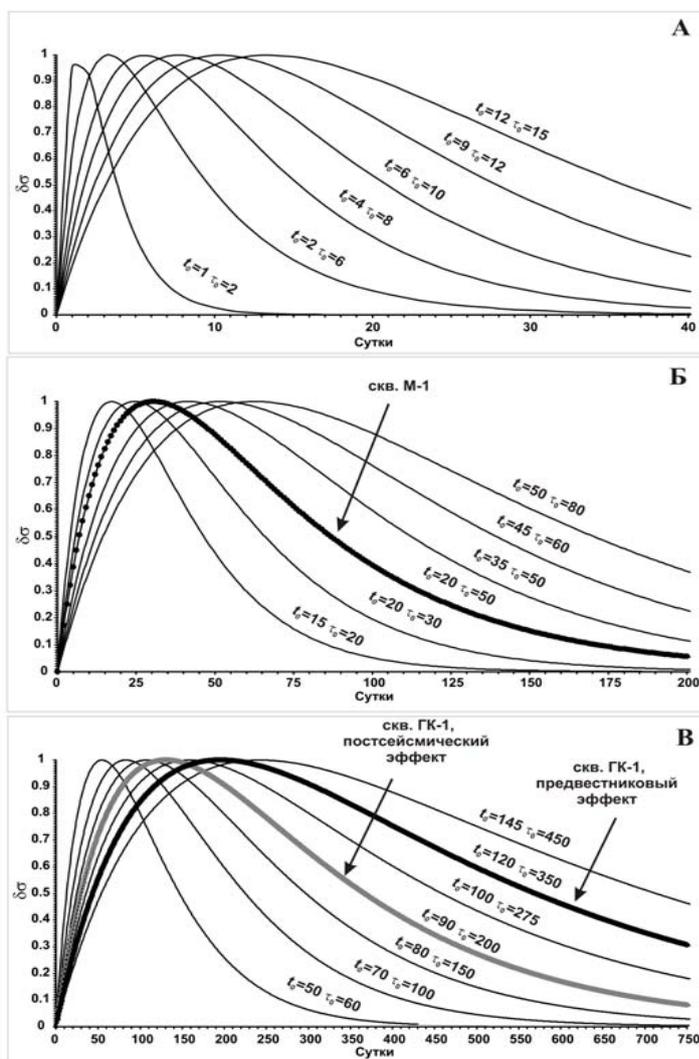
На рис. 3 приведены теоретические изменения концентраций компонентов химического состава подземных вод, рассчитанные для разных значений параметров t_0 и τ_0 при возникновении гидрогеохимических аномалий. На вертикальной оси показаны изменения концентрации компонента химического состава воды в долях амплитуды его максимального изменения на стадии аномалии $\delta\sigma$, принятой за единицу.

Для практического выделения гидрогеохимической аномалии в изменениях отдельного компонента состава воды также важным является соотношение между амплитудой аномалии $\delta\sigma$ и ошибкой его химического анализа [4].

Заключение

Приведенные результаты, а также разнообразие технических условий и гидрогеологических обстановок формирования химического состава подземных вод в сейсмоактивных регионах требуют совершенствования метода гидрогеохимических наблюдений с целью обнаружения ГГХП. Для этого необходимо внедрять в практику сейсмопрогностических работ автоматизированные системы регистрации концентраций отдельных компонентов и интегральных показателей химического состава воды, таких как электропроводность, pH, Eh, с периодичностью не реже одного измерения в час.

Если параметры t_0 и τ_0 малы (рис. 3, А), то при относительно большой периодичности наблюдений аномалия может не выделяться, либо представление о ее форме будет искажено. Например, гидрогеохимическая аномалия в скв. М-1 по морфологическим признакам



классифицировалась в [2] как “скачкообразная”. В данном случае причиной неверного суждения является недостаточная периодичность наблюдений в 3 сут, которая не позволяла оценить реальную форму аномалии по вариациям временных рядов (рис. 3 Б). Но такая периодичность наблюдений оказалась достаточной для оценки нормальных “бухтообразных” форм гидрогеохимических аномалий в изменениях концентрации хлор-иона в воде скв. ГК-1 на стадиях подготовки сильных землетрясений и воздействия сейсмических волн (рис. 3 В).

Рис. 3. Расчетные изменения концентрации макрокомпонентов в воде при гидрогеохимической аномалии, рассчитанные по модели [4, 11] при условной величине амплитуды аномалии $|\delta\sigma_0| = 1$ для разных значений параметров t_0 и τ_0 : А – $t_0 = 1 - 12$ сут, $\tau_0 = 2 - 15$ сут; Б – $t_0 = 15 - 50$ сут, $\tau_0 = 20 - 80$ сут; В – $t_0 = 50 - 145$ сут, $\tau_0 = 60 - 450$ сут.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00337.

Список литературы

1. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
2. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–37.
3. Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Аномальные изменения химического состава подземных вод в связи с Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$) // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 1. С. 39–49.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.
6. Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. Химический состав подземных вод режимных водопроводов Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62. DOI: 10.1134/S0203030618040041.
7. Нурматов У.А., Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Юсупджанова У.А. Связь особенностей проявления гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений с сеймотектонической обстановкой // Геология и минеральные ресурсы. 2016. № 2. С. 38–43.
8. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112.
9. Юсупов Ш.С., Нурматов У.А., Шин Л.Ю. и др. Аномальные вариации гидрогеосейсмологических параметров в период возникновения Туябугузского и Маржанбулакского землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. // Докл. АН РУз: ФАН, 2014. №6. С. 38–40.
10. Kopylova G., Boldina S. Anomalies in Groundwater Composition Caused by Earthquakes: Examples and Modeling Issues // E3S Web of Conferences 98, 01029 (2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199801029> WRI-16.
11. Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modelins of hydrogeochemical anomalies induced by distant eathquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. I 57. P. 717–726.