

К ВЫБОРУ ОБЪЕКТОВ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Т.Л. Ибрагимова

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

tam.anay@yahoo.com

Аннотация. Рассматриваются критерии отбора объектов для организации системы гидрогеохимического мониторинга, ориентированного на решение задач прогноза землетрясений. Обоснована необходимость пересмотра действующей сети наблюдений РЦСПМ в пользу использования самоизливающихся глубоких скважин с естественным режимом, не подверженных влиянию техногенных факторов. Аргументируется, что именно такие объекты способны обеспечить достоверную и не искаженную гидрогеохимическую информацию.

Ключевые слова: гидрогеохимический мониторинг, прогноз землетрясений, сейсмичность, подземные воды, предвестники, выбор объектов.

Введение

Методы поиска предвестников землетрясений, основанные на выявлении аномальных вариаций в гидрогеохимических показателях подземных вод, на сегодняшний день являются одними из ведущих в мировой сейсмологической практике. Как самостоятельное научное направление, гидрогеохимический метод поиска предвестников землетрясений закрепился в начале 70-х годов прошлого столетия после официальной регистрации научного открытия № 129 «Явления изменения химического и газового (элементы и изотопы) составов подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям» [Мавлянов и др., 1973]. Приоритет открытия (от 21 февраля 1966 г.) основан на исследованиях, проводившихся в Институте гидрогеологии и инженерной геологии в Ташкенте до разрушительного землетрясения 1966 г., и показавших, что накануне катастрофы концентрация, например, радона в термоминеральной воде возросла почти в 5 раз.

Особенности проявления аномальных вариаций в газо-химическом составе подземных вод как во всем мире, так и на территории Узбекистана, в т. ч. в различных сеймотектонических условиях, описаны в многочисленных работах [Lu et al., 2024; Zhou et al., 2020; Barberio et al., 2017; Султанходжаев, 2006; Барсуков и др., 1992; Копылова и др., 2020; Ибрагимова, 2016; Ибрагимова, 2024а; Ибрагимова, 2024б и др.], получены эмпирические зависимости, связывающие амплитуду и длительность аномалий некоторых гидрогеохимических показателей с параметрами готовящегося землетрясения, предложены механизмы формирования предвестников, осуществлен практический прогноз нескольких сильных землетрясений.

Вместе с тем остаётся открытым вопрос о корректности выбора наблюдательных объектов: от глубины и условий эксплуатации скважины напрямую зависит качество и интерпретируемость получаемых данных. Для Узбекистана данная проблема особенно актуальна: существующая сеть гидрогеосейсмологических наблюдений в значительной мере представлена скважинами с техногенно-нарушенным режимом (так называемым «крановым»), а также неглубокими скважинами, что нередко приводит к ложным тревогам или отсутствию реакции. Настоящая работа направлена на уточнение критериев выбора объектов гидрогеохимического мониторинга, позволяющих минимизировать подобные ошибки.

Объект и предмет исследования, исходные данные и методы исследования. Выбору параметров геохимических наблюдений, оценке их информативности, сопоставимости данных многолетнего геохимического мониторинга, методикам выделения полезного сигнала на фоне помех и сезонных вариаций и многокомпонентной обработке с целью идентификации сейсмологической обстановки на предмет возникновения землетрясения в конкретной сейсмоактивной зоне для территории Узбекистана посвящены работы [Беляев и др., 1990; Султанходжаев, 2006; Ибрагимова, Азизов, 2012; Ибрагимова, 2024а; Ибрагимова, 2024б и др.].

При этом методы математической статистики предполагают, что анализируемые данные формируют сопоставимый и непрерывный временной ряд с одинаковой частотой опробования. Если в ряде присутствуют участки, полученные с использованием разных методик, приборов или при изменившихся внешних условиях (например, реконструкция скважины, замена оборудования), это может привести к ложным трендам, псевдоаномалиям и некорректным выводам. Однородность данных позволяет уверенно выделять достоверные аномалии, отражающие реальные геодинамические процессы, а не технические или организационные сбои. Только при соблюдении этого условия возможна надежная интерпретация изменений химического состава подземных вод как возможных предвестников сейсмических событий [Беляев и др., 1990].

Обоснованный выбор наблюдательных скважин – один из ключевых этапов при организации геохимического мониторинга сейсмической активности. Этот выбор определяется совокупностью геологических, гидрогеологических и геодинамических факторов, которые обеспечивают наибольшую чувствительность к предвестникам землетрясений. Обоснование научно-методического подхода к организации сейсмопрогнозных исследований, в т. ч. гидрогеосейсмологических, в Узбекистане подробно обсуждено еще в [Сейсмическое районирование..., 2002]. В то же время большинство исследователей во всем мире, помимо учета указанных факторов, основываясь на многолетних исследованиях, сходятся во мнении, что для геохимических наблюдений наиболее предпочтительны самоизливающиеся артезианские скважины. Это обусловлено тем, что напорные воды обладают значительно более стабильным гидродинамическим режимом по сравнению с грунтовыми водами [Sato et al., 2020], поскольку в меньшей степени подвержены влиянию внешних (экзогенных) и техногенных воздействий. Кроме того, использование самоизливающихся скважин существенно упрощает автоматизацию геохимического мониторинга и отбор проб. Из числа эксплуатируемых скважин для геохимических наблюдений могут использоваться только такие, где применяется схема «разорванной струи», т. е. вода из скважины с нерегулируемым естественным расходом поступает в специальную емкость, откуда и осуществляется отбор воды для нужд, не связанных с прогностическими задачами. Скважины, эксплуатируемые в «крановом режиме», для наблюдений не пригодны [Барсуков и др., 1992].

На значимую роль в изучении гидрогеохимических предвестников условий проведения наблюдений указано, например, и Г.Н.Копыловой. В случае скважин с нарушенным (техногенным) режимом функционирования могут возникать неопределенности в разделении вариаций гидрогеохимических параметров, связанных с эксплуатацией подземных вод, и вариаций, вызванных процессом подготовки землетрясения [Копылова и др., 2022].

Также необходим обязательный минимум регистрируемых параметров, отсутствие которого существенно затруднит или даже сделает невозможной интерпретацию получаемой геохимической информации. Такими параметрами являются дебит изливающейся воды, ее температура и атмосферное давление. Кроме того, на наблюдательном пункте при регистрации любого геохимического параметра должны фиксироваться и метеорологические показатели. Вот пример из практики [Киссин, 2009]. Во время наблюдений на скважине Ганчи Ферганского полигона в начале июня 1981 г. зафиксировано кратковременное повышение уровня воды на 4,5 см. Эту вариацию нельзя было связать с перепадами атмосферного давления или осадками (было известно, что их выпадение не влияет на ход уровня воды в скважине). Появилось предположение, что данная аномалия уровня может рассматриваться как предвестник землетрясения. Однако выяснилось, что в районе Ганчи 30 и 31 мая 1981 г. прошли сильные, необычные для этой местности ливни (за два дня выпало 60-70 мм осадков), которые вызвали такой подъем уровня подземных вод.

Процессы, приводящие к возникновению гидрогеохимического прогнозного сигнала, протекают либо в породах прифильтровой зоны скважины, либо непосредственно в ее стволе. Немаловажную, а в ряде случаев и определяющую, роль в появлении этого сигнала, играет процесс спонтанного газоотделения, свойственный практически всем самоизливающим скважинам и источникам термальных вод. Этот процесс, вызванный падением гидростатического давления при движении воды по стволу скважины, приводит к перераспределению газовых компонентов подземных вод между раствором и возникающей газовой фазой, причем скорость перераспределения зависит от целого ряда изменяющихся факторов: скорости движения воды по стволу скважины, степени турбулентности потока, изменения атмосферного давления, изменения минерального состава и т. п. В связи с этим газо-водная эмульсия оказывается весьма

чувствительной к внешним воздействиям, в т. ч. и к деформационным и акустическим воздействиям вмещающих горных пород. Проведенные на различных скважинах эксперименты показали, что даже незначительное изменение условий истечения воды из устья скважины приводит к существенным изменениям результатов наблюдений. Например, на скважине Ф-4 (Файзабад) [Барсуков и др., 1992] была изменена конструкция оголовка, что привело к небольшому увеличению давления (не более 200 мм водяного столба). В результате этого резко уменьшилась амплитуда вариаций содержания гелия в пробах (в 2-3 раза). Известны случаи, когда не оборудованные скважины, в которых были обнаружены отчетливые сезонные и даже суточные вариации того или иного компонента, после реконструкции оголовка практически теряли эти свойства. Причина этого может состоять в том, что вследствие изменения гидравлического сопротивления оголовка в скважине, создается избыточное давление по сравнению с состоянием свободного истечения воды. При этом происходит смещение стационарного положения в системе растворенный газ–спонтанный газ. Для равновесной системы это смещение привело бы к единовременному изменению равновесного соотношения фаз. В неравновесной системе, находящейся в колебательном режиме, оно не только изменяет положение «нуля», относительно которого происходит колебание, но и существенным образом влияет на амплитуду этих колебаний. Избыточное давление может привести к тому, что нижняя граница зоны вскипания поднимется выше уровня отбора проб и система потеряет чувствительность к колебаниям давления. Результаты, подтверждающие это, были получены, например, при проведении режимных наблюдений на месторождении термальных вод Иссык-Ата в Киргизии [Бакалдин, Серебренников, 1985]. Система обобщенных критериев выбора наблюдательных скважин для повышения достоверности прогнозных данных приведена в таблице.

Критерии пригодности скважин для гидрогеохимического мониторинга
Well suitability criteria for hydrogeochemical monitoring

Критерии	Требования	Научное обоснование
Гидродинамический режим	Самоизливающиеся артезианские	Исключает техногенные помехи, обеспечивает стабильность дебита
Глубина	>900 м	Устранение сезонных и поверхностных факторов
Стабильность параметров	Постоянный дебит и температура	Надежность временных рядов
Отсутствие вмешательства	Не используется для хозяйственных нужд	Минимизация техногенных искажений
Сопутствующие измерения	Регистрация Р, Т, метеопараметров	Корректная интерпретация аномалий

Результаты и обсуждение. В соответствии с постановлением Президента Республики Узбекистан «О мерах по коренному повышению эффективности системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» № ПП-5066 от 1 июня 2017 г. создан Республиканский центр сейсмопрогностического мониторинга Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан на базе Службы срочных донесений и Республиканской сети сейсмологического мониторинга сейсмической опасности и прогностического мониторинга. Республиканский центр сейсмопрогностического мониторинга (РЦСМ) ответственен за проведение мониторинга сейсмической опасности на территории республики и трансграничных зон, а также на природно- и техногенно-опасных территориях и важных объектах. В настоящее время в РЦСМ гидрогеохимические наблюдения проводятся на девяти комплексных станциях (КПС), которые осуществляют гидрогеохимический мониторинг за подготовкой и проявлением сейсмических событий на территории геодинамических полигонов Узбекистана и контролируют основные сейсмогенные зоны. При этом расположение станций и пунктов наблюдений выбрано с учетом структурного-гидрогеологического районирования, а также сложности блоково-разломного строения земной коры и приуроченности объектов наблюдения к основным сейсмогенным разломам и флексурно-разрывным зонам республики [Сейсмологический атлас..., 2021; Юсупов, 2025 и др.].

В гидрогеологическом плане основным объектом мониторинга гидрогеохимических наблюдений являются подземные воды водонапорных систем мезо-кайнозойских (Mz+Kz) отложений Узбекистана.

Сеть гидрогеосейсмологических наблюдений представлена на рис. 1.

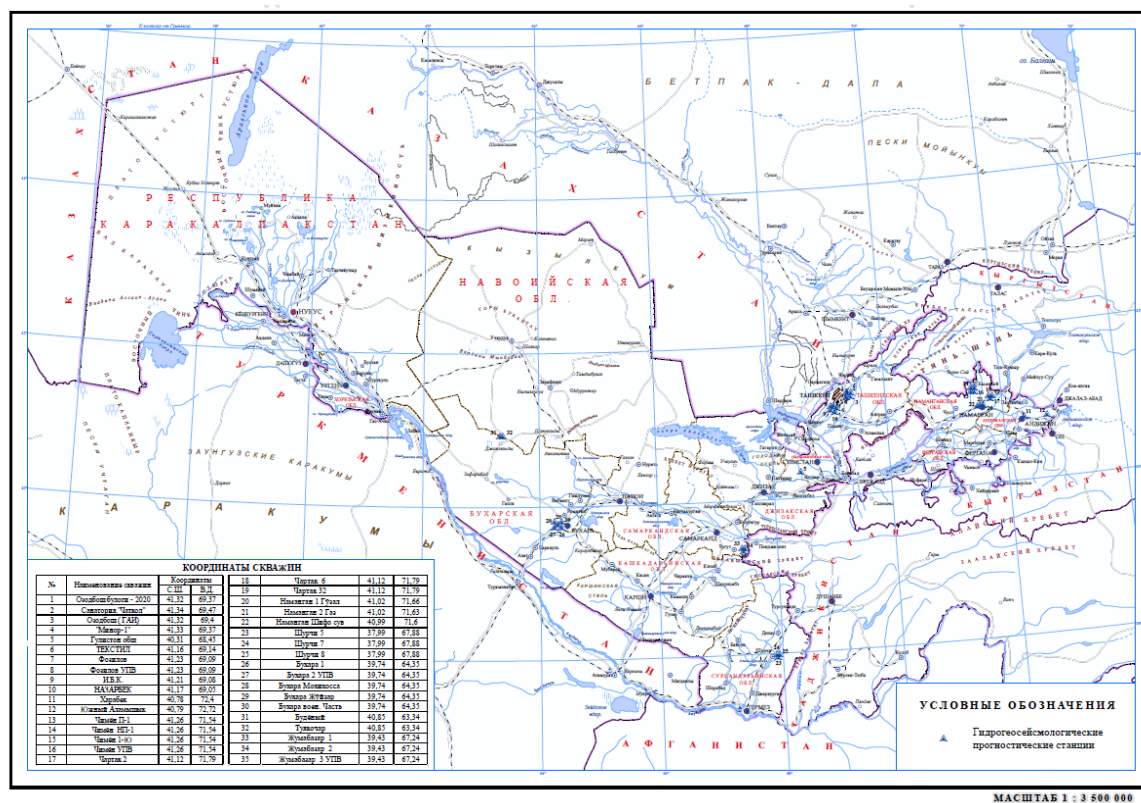


Рис. 1. Схема расположения гидрогеосейсмологических прогностических станций Республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга МЧС [Сейсмологический атлас..., 2021 с дополнениями].

Figure 1. Layout of hydrogeoseismological prognostic stations of the Republican Center for Seismic Prognostic Monitoring of the Emergency Situations Ministry.

Характеристика геолого-тектонических и гидрогеологических условий наблюдаемых полигонов Узбекистана (Ташкентского, Ферганского, Самаркандского и Центрально-Кызылкумского) и объемы проводимых исследований подробно изложены в [Сейсмологический атлас..., 2021; Юсупов, 2025 и др.]. Анализ действующих скважин показывает, что в настоящее время большая часть глубоких скважин работает в крановом режиме, оборудована запорной арматурой, что часто приводит к искажению естественного гидродинамического режима. Имеющие место ложные тревоги и пропуски цели, фиксируемые как в Узбекистане, так и за рубежом, могут быть следствием использования скважин с техногенно-нарушенным режимом. Это затрудняет различение аномалий, связанных с сейсмогенезом, и фоновых сезонных или эксплуатационных вариаций. Так, на рис. 2 смоделированы значения изменения концентрации растворенного гелия в зависимости от глубины и температуры скважины. Модель построена на основе кинетики дегазации [Roy, Ryan, 2010] и с учётом закона Генри [Sander, 2023]. При закрытой скважине глубина, температура и начальная концентрация газа фиксированы, концентрация растворённого гелия быстро изменяется после открытия крана: в течение первых 5 минут происходит снижение концентрации на 90% по сравнению с исходным значением, что создаёт ложные вариации, не связанные с сейсмическими процессами.

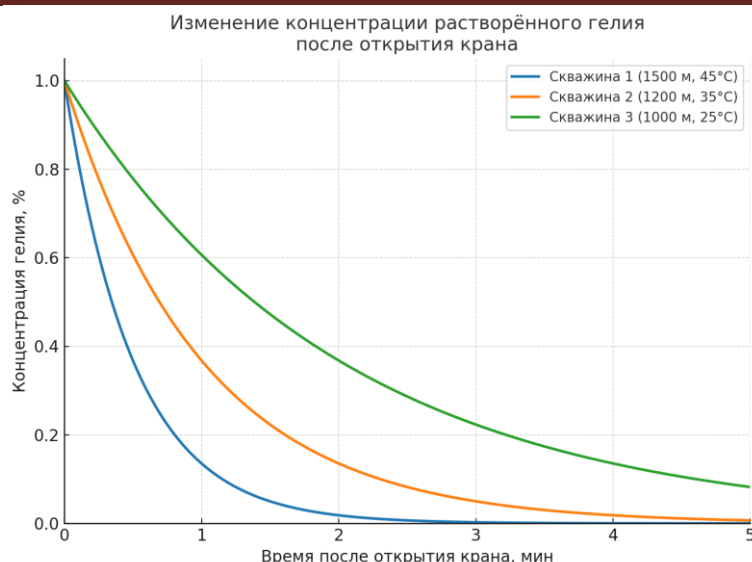


Рис. 2. Изменение концентрации растворённого гелия во времени после открытия крана при отборе проб подземных вод.

Figure 2. Change in the concentration of dissolved helium over time after opening a tap during groundwater sampling.

Таким образом, приоритетным направлением в развитии мониторинговой сети Узбекистана должно стать переосмысление текущей схемы размещения пунктов наблюдений с акцентом на самоизливающиеся источники с естественным режимом. Следующим же шагом может быть создание моделей формирования гидрогеохимического предвестника в отдельных скважинах с учетом, например, их резонансных свойств, либо времени релаксации импульсов давления воды и времени движения смешанной воды [Барсуков и др., 1992; Ибрагимова, 2013; Zhou et al., 2021; Копылова и др., 2022], с целью оценки параметров возмущенного состояния системы скважина – водовмещающая порода при подготовке землетрясения.

Выводы и рекомендации

Для целей прогноза землетрясений наиболее предпочтительны самоизливающиеся, глубокие скважины, функционирующие без давления на оголовке и обеспечивающие свободное истечение воды. Приоритет должен быть отдан объектам, в которых зафиксированы стабильные параметры в условиях естественной фильтрации и с возможностью регистрации сопутствующих характеристик (дебит, температура, давление). Необходимо провести аудит и реконфигурацию сети РЦСПМ, исключив скважины с нарушенным режимом эксплуатации, либо переоборудовав их.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимова Т.Л., Серебренников В.С., Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений. - М.: Наука, 1992. - 213 с.
2. Беляев А.А., Ибрагимова Т.Л., Султанходжаев А.Н. Оценка сопоставимости данных геохимического мониторинга // Геохимия. - 1990. - № 1. - С. 145-151.
3. Ибрагимова Т.Л., Азизов Г.Ю. Информативность комплекса гидрогеохимических параметров подземных вод в различных геодинамических условиях // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т.: ИС АН РУз, 2012. - № 9. - С. 60-64.
4. Ибрагимова Т.Л. Изученность влияния сеймотектонических условий на особенности проявления гидрогеосейсмологических предвестников // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - 2013. - № 10. - С. 54-60.
5. Ибрагимова Т.Л. О выделении полезного (прогнозного) сигнала в результатах гидрогеохимических наблюдений для поиска предвестников землетрясений // Проблемы сейсмологии. - 2024а. - № 1. - С. 17-29.
6. Ибрагимова Т.Л. Методика многокомпонентной обработки рядов гидрогеохимических наблюдений, позволяющая идентифицировать текущую сейсмологическую

обстановку на предмет возможности возникновения сильного землетрясения в конкретной сейсмоактивной зоне // Проблемы сейсмологии. - Т., 2024б. - Т. 6. - № 2. - С. 37-46.

7. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. - М.: Наука, 2009. - 328 с.

8. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К. Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. - 2022. - Т. 67. - № 10. - С. 921-941.

9. Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия и Республики Узбекистан) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2020. - № 4. - Вып. 48. - С. 5-20.

10. Мавлянов Г.А., Уломов В.И., Султанходжаев А.Н., Хасанова Л.А., Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., Спиридонов А.И., Мавашев Б.З., Хитаров Н.И. Явление изменения химического состава подземных вод при землетрясении: № 129 от 21 февраля 1966 г. // «Открытия. Изобретения». Официальный бюллетень Патентного ведомства. - М., 1973. - № 42. - С. 3-4.

11. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - 132 с.

12. Сейсмологический атлас Узбекистана. - Т.: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2021. - 96 с.

13. Султанходжаев А.Н. Основы гидрогеосейсмологии. - Т.: АН РУз, 2006. - 165 с.

14. Юсупов Ш.С. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений (Ч. 1). - Т.: Innovatsion rivojlanish nashrijot-matbaa uyi, 2025. - 296 с.

15. Barberio M.D., Barbieri M., Bili A., Doglioni C., Petitta M. Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence // Scientific Reports. - 2017. - Vol. 7. - 11735. - DOI: 10.1038/s41598-017-11990-8.

16. Lu C., Zhou X., Jiang J., Li J., Li J., Wu J., Zhu X., Li J., Xing G., Cui S. The Hydrogeochemistry of and Earthquake-Related Chemical Variations in the Springs along the Eastern Kunlun Fault Zone, China // Water. - 2024. - 16(9): 1215. DOI:10.3390/w16091215.

17. Roy S., Ryan M.C. Helium as a natural tracer of groundwater discharge // Hydrology and Earth System Sciences. - 2010. - 14. - 1797-1808.

18. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent // Atmospheric Chemistry and Physics. - 2023. - 23. - 10901-12440, <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>.

19. Sato T., Kazahaya K., Matsumoto N., Takahashi M. Deep groundwater discharge after the 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake, Japan // Earth Planets Space. - 2020. - 72. - 54. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01181-7>.

20. Zhou Z., Tian L., Zhao J., Wang H., Liu J. Stress-Related Pre-Seismic Water Radon Concentration Variations in the Panjin Observation Well, China (1994-2020) // Front. Earth Sci. - 2020. - Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.596283>.

21. Zhou Z., Zhong J., Zhao J., Yan R., Tian L., Fu H. Two Mechanisms of Earthquake-Induced Hydrochemical Variations in an Observation Well // Water. - 2021. - 13(17). DOI:10.3390/w13172385.

Zilzilalarni prognozlashda gidrogeokimyoviy monitoring uchun quduqlarni tanlash

T.L. Ibragimova

Abstrakt. Ushbu tadqiqot zilzilalarni bashorat qilishga qaratilgan gidrogeokimyoviy monitoring tarmog'ini amalga oshirish uchun tegishli quduqlarni tanlash mezonlarini belgilaydi. Maqolada antropogen ta'sirlar ta'sirida bo'lmagan tabiiy oqim rejimlariga ega chuqur, o'z-o'zidan oqadigan quduqlarga ustuvorlik berish uchun SMRMning joriy kuzatish tizimini qayta ko'rib chiqish muhimligi ta'kidlangan. Ta'kidlanishicha, bunday sharoitlar potentsial seysmik prekursorlarni aniqlashni kuchaytirishi mumkin bo'lgan ishonchli va buzilmagan gidrogeokimyoviy ma'lumotlarni olishni ta'minlash uchun zarurdir.

Kalit so'zlar: gidrogeokimyoviy monitoring, zilzilani bashorat qilish, seysmik faollik, er osti suvlari, prekursorlar, joy tanlash.

Towards the selection of wells for hydrogeochemical monitoring in earthquake forecasting

T.L. Ibragimova

Abstract. This study outlines a set of criteria for selecting appropriate wells for the implementation of a hydrogeochemical monitoring network aimed at earthquake forecasting. The paper emphasizes the importance of revising the current SPMC observation system to prioritize deep, self-flowing wells with natural flow regimes that are not influenced by anthropogenic activities. It is argued that such conditions are essential to ensure the acquisition of reliable and undistorted hydrogeochemical data, which can enhance the identification of potential seismic precursors.

Key words: hydrogeochemical monitoring, earthquake forecasting, seismic activity, groundwater, precursors, site selection.