

УДК 550, 348; 556.3; 550.4

Кендирбаева Дж.Ж.  
Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан

## ДИНАМИКА РЕЖИМА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В КЫРГЫЗСТАНЕ И ИХ ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

**Аннотация.** Рассмотрена динамика изменения режима гидродинамических параметров в пространственно-временном выражении. Предложены пути дальнейшего повышения эффективности гидродинамического мониторинга в Кыргызстане для оперативного слежения за состоянием напряжённого состояния земной коры в условиях сейсмического затишья и реализации землетрясений.

**Ключевые слова:** подземная вода, уровень и атмосферное давление уровня грунтовых вод, наблюдательная сеть, повышение деформации, слежение за гидродинамическими параметрами, вариационные графики.

## КЫРГЫЗСТАНДЫН ГИДРОДИНАМИКАЛЫК ПАРАМЕТРЛЕРИНИН РЕЖИМИНИН ДИНАМИКАСЫ ЖАНА АЛАРДЫН ТРИГГЕРЛЕРИНИН ТААСИРЛЕРИ

**Кыскача мазмуну.** Гидродинамикалык параметрлердин режиминде мейкиндик-убакыт шарттарынын өзгөрүү динамикасы каралат. Кыргызстанда сейсмикалык тынч жана жер титирөөлөрдүн шарттарында жер кыртышынын стресс абалына оперативдүү мониторинг жүргүзүү үчүн гидродинамикалык мониторингдин натыйжалуулугун мындан ары жогорулатуунун жолдору сунушталууда.

**Негизги сөздөр:** жер астындагы суулар, жер астындагы суулардын деңгээли жана атмосфералык басым, байкоо тармагы, деформациянын жогорулашы, гидродинамикалык параметрлердин мониторинги, вариациялык тилкелер.

## DYNAMICS OF THE REGIME OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN KYRGYZSTAN AND THEIR TRIGGER EFFECTS

**Abstract.** The dynamics of changes in the regime of hydrodynamic parameters in spatio-temporal terms is considered. Variants are proposed to increase the efficiency of hydrodynamic monitoring in Kyrgyzstan for operational monitoring of the development of the stressed state of the earth's crust under conditions of seismic calm and after earthquakes.

**Keywords:** groundwater, groundwater level and atmospheric pressure, observational network, strain increase, monitoring of hydrodynamic parameters, variation graphs.

**Актуальность проблемы.** Взаимодействие в системе Земля-Луна-Солнце является одним из важнейших факторов, определяющих динамические процессы в недрах Земли и её оболочках, а также в подземных водах. Примером может служить изменение миграции подземных газов в результате разуплотнения среды, приводящей к определённым периодичностям и циклическостям, например, радоновых эманаций. В этом плане реакция подземных вод на подготовку и реализацию сейсмических процессов относится к категории широко известных фактов. Имеющиеся данные свидетельствуют о высокой чувствительности гидрогеологического режима на внешние возмущения, в частности, на приливное воздействие. Основные особенности их спектра связаны с

характерными, ярко выраженными спектральными пиками, свидетельствующими о наличии периодичностей в вариациях уровня подземных вод. Как указывает [1], гидродинамическое поле на стадии подготовки сильных землетрясений участвует в формировании устойчивых в пространственно-временном выражении структур «сжатие-растяжение». Нередко после землетрясения в даже удалённом регионе, где размещена наблюдательная сеть, подобные структуры, имеющие длительную историю развития, обычно разрушаются, если проявилось воздействие сейсмической энергии.

В Кыргызстане гидродинамический мониторинг, основанный на постоянном слежении за режимом Р-Т условий, большей частью в термальных водах, циркулирующих как в верхних, так и нижних слоях геологических образований, функционирует на севере и юге. Визуально их изменения прослеживаются в виде как резких скачкообразных, так и плавно протекающих кривых. Но фундаментальная суть и механизмы перестройки гидродинамических полей в свете перераспределения флюидных составляющих в литосфере, происходящих за счёт смены напряжения изучены недостаточно, вследствие охвата широкого круга информации. При этом воздействие Луны и Солнца определяет не только механику деформирования Земли и преобразование вещества, но также режим существования гидродинамических полей

Сведения, по которым удаётся зафиксировать их временные перестройки в условиях сейсмической активизации, составляют ничтожную долю из-за несовершенства методики проведения измерения и доставки материалов от точки наблюдения до научных лабораторий, в-основном, из-за дискретности наблюдений. Такая тенденция, существующая в Кыргызстане, является не исключением, т. е. подобный уровень доминирует во всем мире.

Причины амплитудных расхождений в них рассматриваются как закономерные «помехи», в которых одними из основных факторов выступает сезонная цикличность, а также случайные сигналы, совпадающие с периодами до, в течении и после сейсмических толчков. Например, в Институте сейсмологии НАН КР на основе ретроспективного анализа произошедших землетрясений достигнуты определённые успехи в прогнозировании землетрясений с  $K_R$  более 12.0-13.0 [2].

**Методика исследований.** Многочисленные наблюдения об изменениях флюидодинамического режима за тысячи километров от эпицентра основаны на моделях, в которых динамические деформации от дальнего землетрясения инициируют сейсмичность через перенос флюида и изменение порового давления. Эти процессы способны изменить эффективность нормального напряжения настолько, чтобы инициировать разрушение, что, в свою очередь, через некоторое время может привести к возникновению неустойчивости. В поддержку подобной модели можно отнести то обстоятельство, что к такой динамике чувствительными оказываются геотермальные области, к которым относится Кыргызстан. Поэтому в данной работе методические принципы перестройки гидродинамических параметров исходят из современных представлений о преобладании вертикального движения подземных вод. Это обусловлено облегчённым вариантом преодоления сопротивления вышележающих и слабопроницаемых горных пород, по сравнению с латеральным их движением в сторону погружения водоносных горизонтов, где растёт сопротивление таковых.

В Кыргызстане длительность целенаправленного изучения режима подземных вод для оценки их взаимосвязи с развитием сейсмической обстановки превышает 50 лет. По их сведениям, за это время для изучения вопросов прогноза землетрясений достигнуты, как сказано выше, определённые научно-практические результаты.

В нашем случае развивающиеся сейсмические процессы и асейсмические периоды большей частью отчётливо отражаются на временных графиках в зависимости от климатических условий и сезонных факторов. Дело в том, что в процессе анализа и интерпретации временных рядов гидродинамических параметров используется также

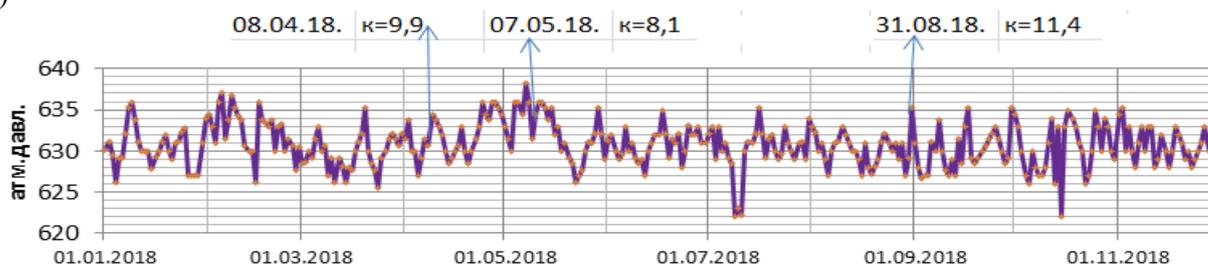
факторный анализ, который учитывает аналогичность или самоподобие преобладающих условий, а также сил, не связанных с сейсмичностью.

Согласно теории Н.П. Добровольского, литосфера перед сильным землетрясением находится в напряжённом состоянии на достаточно большой территории, при этом чем выше его магнитуда, тем на большей площади проявляются аномалии в среде. На основе сопоставления вертикальных фильтрационных процессов и градиентов напора (пластовых давлений) с особенностями структурно-тектонических условий можно показать дальность латеральной миграции подземных вод от области современного питания к глубоким горизонтам, например, в Иссык-Кульском артезианском бассейне. Необходимо подчеркнуть, что водоносные породы в земной коре, в которых циркулируют наши объекты изучения, находятся в напряжённом состоянии под действием как гравитационного, так и тектонического полей. Согласно данным мониторинга [3], сейсмотектонические волны, сжимающие или расширяющие водоносные породы, образуют различные поровые давления, в результате чего создаются гидродинамические градиенты. Это может свидетельствовать о динамике структурной перестройки гидродинамических полей, которая, улавливая общие признаки подъёма газоводяных потоков, усиливается триггерным влиянием вмещающей среды.

**Полученные результаты и их обсуждение.** Явления триггерной сейсмичности в геотермальных регионах наблюдались ранее. Первым примером триггерного события было землетрясение Landers в 1992 г. с магнитудой 7.3, которое вызвало рой землетрясений в западных штатах США.

Установлено, что в распределении временных вариаций режима подземных вод существуют закономерный и случайный типы: первому соответствует общности экзогенных факторов, связанных не только с климатическими и сезонными колебаниями, но и с форматом 11-летнего цикла солнечной активности, а второй на этом фоне выступает по амплитудам и формам контрастно, нередко совпадая с периодами до, в течение и после реализации сейсмичности более  $K_R \geq 11.0$  [4]. Например, сопоставлением изучаемых показателей в годовом режиме 2018 г. видно, что их временные кривые представлены мигающим ходом даже за короткое время. Как видно из рисунка 1, гидродинамические показатели временных рядов по скважине глубиной 125 м «Кара-Ой» по сезонам года распределяются плавно и равномерно. Поэтому, с учётом геолого-структурных условий, выявлена разная тензочувствительность гидродинамических эффектов, наблюдаемых в этой скважине. Обнаружено, что с января по октябрь месяцы происходит постепенное, причём ступенчатое снижение температуры воды от  $18^{\circ}\text{C}$  до  $13^{\circ}\text{C}$ , что чётко иллюстрирует преобладание сезонного фактора в виде медленного спада в сторону к зимнему времени.

а)



б)

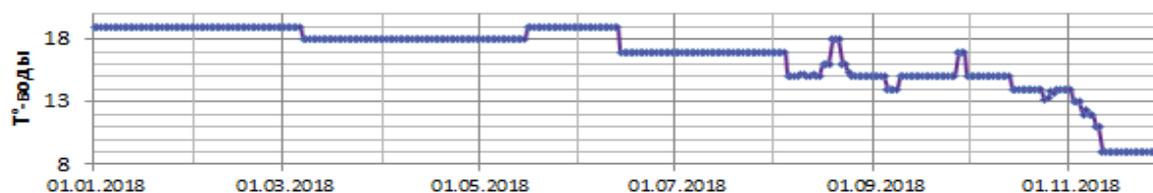


Рисунок 1. Вариации атмосферного давления (а) и температуры (б) воды. Скважина «Кара-Ой».

Необходимо отметить, что медленные и быстрые изменения гидродинамических показателей, в большинстве случаев, имеют противоположенные знаки, в связи с чем послужили основой раскрытия механизмов их формирования и преобразования. С нашей точки зрения, в медленных изменениях гидродинамических показателей преобладает деформационный механизм, а в быстрых - перколяционный (рисунок 1 (а, б)). Так, во временных вариациях температуры воды скважины и атмосферного давления, действительно, одновременно присутствуют климатические факторы, благодаря чему оба параметра находятся в естественном режиме: спад температуры воды повышается через небольшой скачок, который держится до зимнего периода, свидетельствуя о наступлении его осеннего подъёма, соответствуя при этом величинам колебания атмосферного давления.

Чуйский регион в этом плане в отношении сейсмической активизации относительно стабилен [5], за исключением произошедших сейсмических событий, т.е. с  $K_R \leq 10.0 - 8.0$  с эпицентрами, локализованными на ограниченной площади. Например, в наблюдательном пункте «Аламедин», находящемся на северном склоне Кыргызского хребта, в зоне динамического влияния Чон-Курчакского и Иссык-Атинского разломов, получены надёжные результаты. Так на рисунке 2 проиллюстрированы вариации гидродинамических показателей в неглубокой скважине № 909. На них видно, что нередко появляющиеся скачкообразные траектории, с одной стороны, свидетельствуют об активизации климатических и метеорологических условий, а с другой - о развитии внутриземных напряжений, усиливающих взаимодействие структурных блоков в земной коре.

Здесь практически на фоне сезонной цикличности чётко прослеживаются колебания с амплитудами и формами, напоминающими в тектонических блоках сложную природу развития, обуславливающую каждый раз индивидуальность на подготовку и развития сейсмичности. Например, в скважине 909 «Аламедин» зафиксированы импульсные скачки в поведении Р-Т условий, т.е. уровень воды понижается до 5 см, тогда как, наоборот, повышается величины атмосферного давления ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ) от 86.2 до 84.4  $\text{кгс}/\text{см}^2$  (рисунок 2). Данная картина зафиксирована накануне землетрясений, произошедших на эпицентральной удалении около 42 км.

Таким образом, по всей видимости, эти флуктуации, согласованные в определённой степени с амплитудой и длительностью гидропроявления, не свойственные сезонным явлениям, говорят о возможности предвестниковых признаков не только в глубоких горизонтах, но и в неглубоко залегающих водоносных слоях, если пункты наблюдений непосредственно находятся в зоне подготовки сейсмической активизации.

Все вариационные кривые, построенные по гидродинамическим параметрам, свидетельствуют о ведущей роли качественного состояния водовмещающей среды.

Это также подтверждают данные наблюдений. Судя по гидродинамическим параметрам, имеются нестандартные вариации тренда. Это: асинхронности кривых

температуры подземных вод (УПВ) и атмосферного давления; об аномальности подъёма и спада УПВ с амплитудой, не исключающей возможность возникновения ступенчатого и бухтообразного понижения.

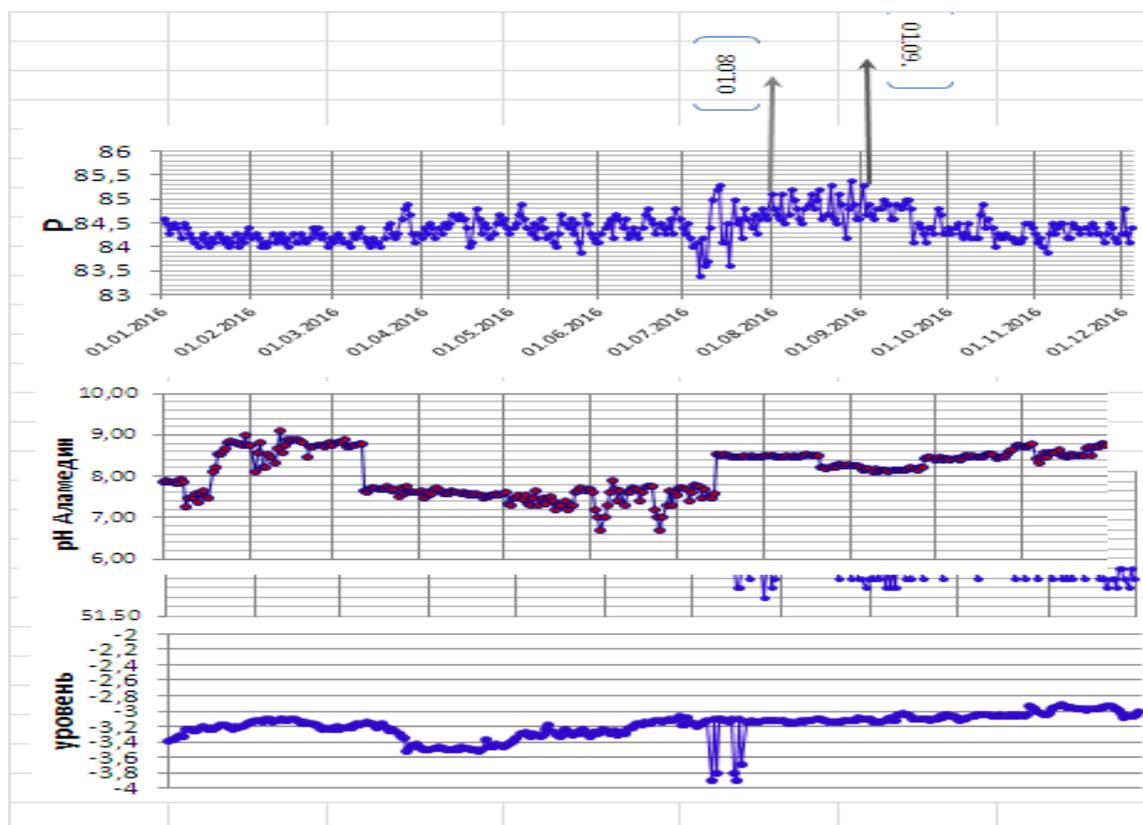


Рисунок 2. Вариационные кривые временных рядов скв. 909 «Аламедин».

С нашей позиции, применяя такой подход, можно выявить главные причины неповторяющихся эффектов одного землетрясения по сравнению с другим, а именно, многообразие потенциальных причин, учитывая чувствительность гидрогеологических разрезов [6].

Проведённый нами анализ данных по вариациям температуры воды в скважинах, расположенных в различных геологических условиях, отчётливо указывает на наличие флюидодинамического режима горных пород от удалённых землетрясений. Так, воздействие низкочастотных сейсмических колебаний может служить одним из эффективных механизмов изменения флюидодинамического влияния разломной зоны и, как следствие, локального перераспределения порового давления. Дело в том, что в большинстве случаев, динамическое воздействие вызывает изменение  $dh$  уровня воды в скважине, которое приближённо описывается в виде следующего соотношения [6]:

$$dh = a \cdot u_m^{0.5},$$

где  $dh$  измеряется в см, а максимальная скорость смещения грунта  $u_m$  в см/с. Значение параметра  $a$ , который можно интерпретировать, как интенсивность реакции скважины на динамическое воздействие, в зависимости от конкретных гидрогеологических условий изменяется от 2 до 10, хотя наблюдаются и значительные отклонения от этого диапазона.

Основная масса данных об остаточных изменениях уровня воды в скважинах также лежит в диапазоне динамических деформаций  $10^{-7}$ – $10^{-5}$ . При таких деформациях трудно ожидать разрушения породы или прорастания трещин в результате прохождения

колебательных процессов. Более вероятными представляются триггерное воздействие в трещинах за счёт избыточного давления, остающегося при прохождении сейсмического импульса, а также эффекты кумулятивного накопления межблоковых деформаций.

Рассмотрим скважину 909 с радиусом  $r$ , вскрывающую на длине  $d$  водоносный пласт. При амплитуде колебания уровня, как приведено выше, равной 5 см, в массиве с пористостью 5% скорость фильтрации воды получаем 0.5 мм/с, т.е. основные перетоки происходят по крупным трещинам при скорости фильтрации  $\approx 50$  мм/с.

Вода скважины «Аламедин», протекая по глубинным трещинам, в квазистационарном состоянии, например, содержит  $10^{10}$ – $10^{11}$  алюмосиликатных частиц микронного размера на кубический метр. Согласно мнению [Осипов и др., 2001], в растворах, содержащих такие частицы в небольших концентрациях, происходит слипание отдельных частиц в результате процессов агрегации, т.е. укрупняются структурные элементы. На отдельных участках трещины, эти коллоидные пленки формируют барьеры, обладающие низкой проницаемостью ( $10^{-18}$ – $10^{-15}$  м<sup>2</sup>), сопоставимой со скальной породой. Такой барьер практически перекрывает движение флюида. Время формирования барьера толщиной в 0.5 мм оценивается в 500–1000 дней, а на таком барьере с коэффициентом фильтрации  $K \sim 5 \cdot 10^{-7}$  м/с скачок давления составляет порядка 1 Кпа. Этот механизм давно известен в нефтяном инжиниринге. При движении жидкости по трещине вязкое напряжение на коллоидальной частице приблизительно описывается выражением  $\tau \approx \eta W/\rho$ , где  $\eta$  – вязкость воды ( $10^3$  Па с) а  $\rho$  – радиус коллоидальной частицы (1 мкм). Таким образом, величина прочности  $\tau_c \sim 1$  Па достигается при скорости потока  $wc \sim 1$  мм/с. Согласно этому соотношению, скорость потока в трещине при сейсмическом воздействии пропорциональна амплитуде колебаний порового давления  $\Delta P$ , но обратно пропорциональна пористости. Однако, скорость потока в каждой конкретной трещине  $wT$  зависит от её максимальной массовой скорости движения грунта  $um$ .

Разрушение мощных барьеров приводит к большему скачку напора и, в конечном итоге, пропорциональному увеличению вариаций уровня воды. Нарушение сейсмическими колебаниями коллоидных плёнок, заполняющих участки трещин в водоносных горизонтах, может привести к перераспределению порового давления и к изменению эффективных напряжений в локальных областях разломной зоны, т.е. является эффективным механизмом триггерного инициирования сейсмических событий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, по территории Кыргызстана концентрационный уровень изменения гидродинамических показателей составляет до 10%, тогда как короткопериодные вариации атмосферного давления совпадают с подготовкой землетрясений с  $K_R=7.7 - 8.3$ , эпицентры которых удалены на расстоянии от 35 км до 51 км.

Возникновение землетрясений может быть обусловлено разнообразными причинами, но общим эффектом, судя по всему, является постепенное накопление малых возмущений, приводящее на определённой стадии к неустойчивости геолого-гидрогеологической среды. Локализации остаточных деформаций на примерах нарушений сплошности массива горных пород показывает, что этот процесс связан с асимметрией динамического влияния разломов и трещин.

Важный вклад в триггерный эффект вносит медленный крип значительной амплитуды и большой длительности, который связан с динамическим импульсным воздействием на разломную зону.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры как фактор формирования геофизических неоднородностей и развития геодинамических процессов. Тез. докладов //Пятые геофизические чтения им. В.В.Федынского. М.: Центр ГЕОН. 2003. –С. 22.

2. Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г. и др. Исследование динамики вариаций уровня подземных вод под воздействием внешних факторов // Проблемы взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 232–244.
3. Кендирбаева Дж.Ж., Гребенникова В.В. Основные результаты гидрогеологических исследований для прогноза сильных землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня. Вестник Института сейсмологии НАН КР. № 2. 2013. С. 33-43. ([kis@mail.elcat.kg](mailto:kis@mail.elcat.kg)).
4. Кендирбаева Дж.Ж. Активность и инерционность отклика системы «подземные воды-сейсмичность» Кыргызстана /Тезисы VIII Междунар. симп. «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» ИС РАН, 2021. С.182-185.
5. Кендирбаева Дж.Ж. Гидротермальные системы Кыргызского Тянь-Шаня- как отражение теории пульсирующей Земли. В сб. материалов Всероссийской конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа». Петропавловск-Камчатский. 2019. С. 171-175.
6. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Павлов Д.В., Перник Л.М. Механика процесса изменения режима деформирования разломных зон динамическими воздействиями /Триггерные эффекты в геосистемах (Под ред. Академика РАН В.В.Адушкина и профессора Г.Г.Кочаряна). М.: 2010. С. 62-71.
7. Мамыров Э., Маханькова В.А., Берёзина А.В., Молдобекова С., Хан В.В. Прогноз вероятного места сильных землетрясений на территории Кыргызстана. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. №1, 2013.
8. Иманкулов Б.И., Кендирбаева Дж.Ж., Кожакова Н.Т. Разломная гидрогеологическая система Кыргызского Тянь-Шаня как отражение влияния эндогенных и экзогенных факторов // Известия Академии наук Республики Казахстан. Серия общественных и гуманитарных наук. 2006. № 2. С. 44-47.

*Рецензент: д.ф-м.н., профессор Муралиев А.М.*