

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН»,
Институт сейсмологии АН Республики Узбекистан*

***ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ :
по данным наблюдений на полуострове Камчатка , Россия,
и в Республике Узбекистан***

Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю.
gala@emsd.ru, www.emsd.ru/lqi

***г. Петропавловск-Камчатский
29 сентября-5 октября 2019 г.***

Гидрогеохимические предвестники – изменения химического состава подземных вод перед сильными землетрясениями (далее **ГГХП**).

ГГХП являются компонентом более общих понятий «**геохимические предвестники**» и «**гидрогеологические предвестники**».

Традиционный метод изучения ГГХП - отбор проб воды и газа на самоизливающихся скважинах и источниках с выполнением химического анализа отдельных компонентов состава воды и газа в лаборатории, создание их временных рядов. Характерная периодичность наблюдений - сутки.

ГГХП, как объект научного исследования, находится в области (1) наук о подземной гидросфере (гидрогеология, гидрогеодинамика, гидрогеохимия), (2) наук химического направления (аналитическая химия, учение о растворах), (3) сейсмологии и др.

Трудности в изучении ГГХП на основе традиционного метода:

- **недостаток гидрогеохимической информации** (система «вода – растворенные минеральные компоненты» представляет электрохимическую систему, которая находится во взаимодействии с водовмещающими породами и газом);
- **влияние «человеческого фактора» на качество данных** наблюдений на стадиях пробоотбор и аналитического определения концентраций отдельных компонентов состава подземных вод и газов.

Содержание доклада:

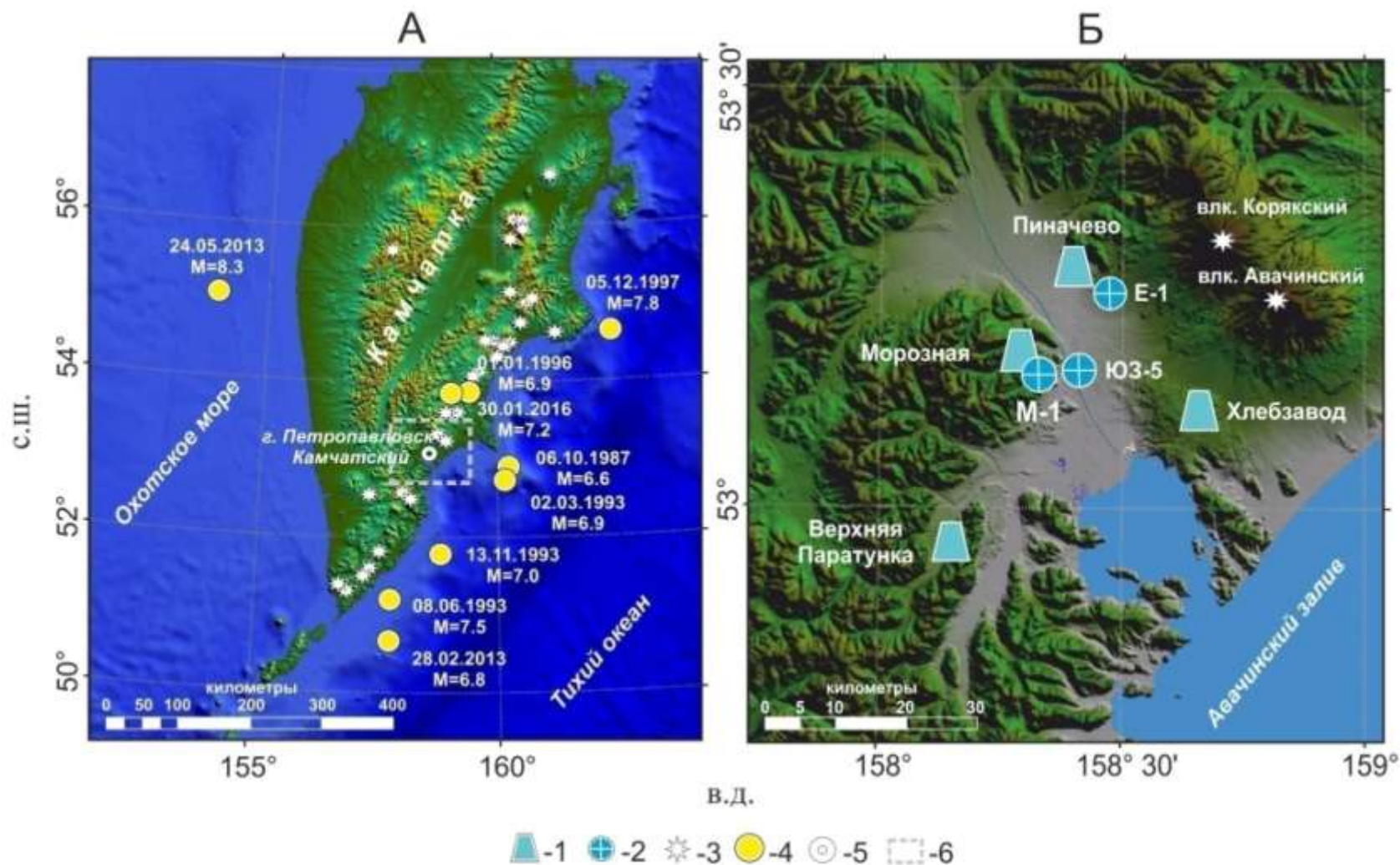
1 - данные о ГГХП по данным наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН на скважинах и источниках территории Петропавловского геодинамического полигона (ПГП), Восточная Камчатка и в Республике Узбекистан (наблюдения на источнике Озодбаш в 2010-2013 гг.)

2 - закономерности проявления ГГХП в связи с сильными землетрясениями и процессы их формирования ГГХП с использованием модели смешивания контрастных по химическому составу вод в зонах повышенной водопроницаемости [Wang et al., 2004; Копылова, Воропаев, 2006; Копылова, Болдина, 2010, Kopylova, Boldina, 2019].

КАМЧАТКА

А- схема расположения Петропавловского геодинамического полигона (ПГП) и эпицентров землетрясений с $M=6.6-8.3$, сопровождавшихся гидрогеологическими (гидрогеохимическими и гидрогеодинамическими) эффектами, включая ГХП;

Б – схема расположения пунктов гидрогеологических наблюдений на территории ПГП: 1 – станции гидрогеохимических наблюдений; 2 - скважины, оборудованные автоматическими системами регистрации уровня, температуры и электропроводности подземной воды.



***Проведение наблюдений на скважинах и источниках ПГП,
лаборатория гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН, 1977 г. - настоящее время***

Измерения дебита и температуры воды



Отбор проб воды и газа



Фото предоставлены В.А. Полетаевым

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕЖИМНЫХ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА, КАМЧАТКА: ТИПИЗАЦИЯ И ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2018 г. Г. Н. Копылова^{1,*}, Н. В. Гусева², Ю. Г. Копылова², С. В. Болдина¹¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" 683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия²ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" 634050 Томск, проспект Ломоносова, 70, Россия

*e-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 30.08.2017 г.

Рассматриваются особенности химического состава и типизации подземных вод семи симондлин-
ющихся скважин и четырех источников с использованием материалов гидрогеохимического опре-
бования в 2014 г. и данных режимных наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН в 1989–1999 гг. Приводит
оценки насыщенности подземных вод отдельными водопроизведениями атмосферными, карбона-
тами, сульфатными вторичными минералами, прослежены ее изменения во времени. Обнаруже-
ны увеличение насыщенности подземных вод вторичными минералами при сильных землетрясениях
сопровождавшихся сотрясениями с интенсивностью $I = 5–6$ баллов по шкале MSK-64. На стадии
подготовки землетрясений такие изменения насыщенности подземных вод вторичными минерал-
ми проявляются в меньшей степени. Обсуждаются перспективы развития системы наблюдений
скважинах и источниках в целях поиска новых видов гидрогеохимических предвестников землетря-
сений.

DOI: 10.1134/S0030306618040041

ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ: 1977–2017 гг.

© 2019 г. Г. Н. Копылова*, С. В. Болдина

Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН"
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

*e-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 07.02.2018 г.

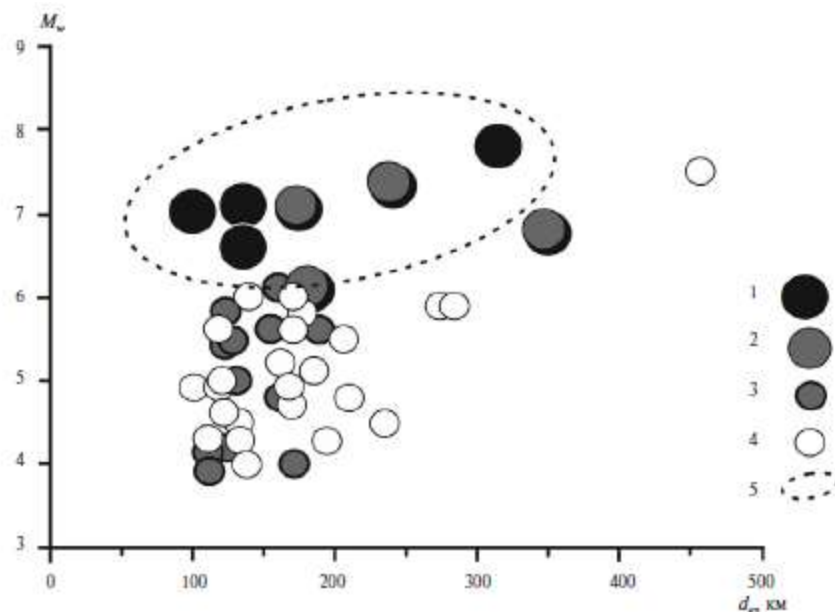
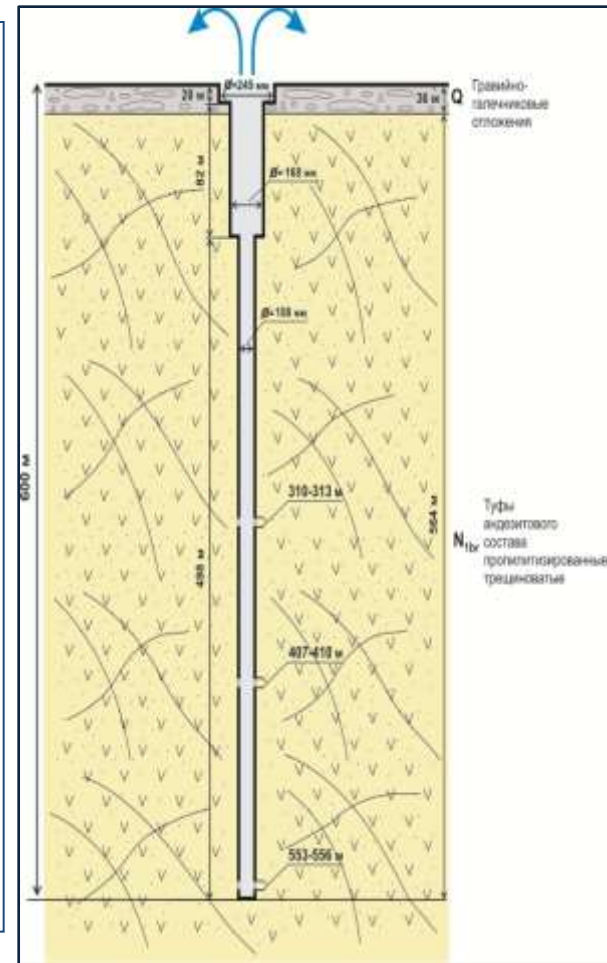
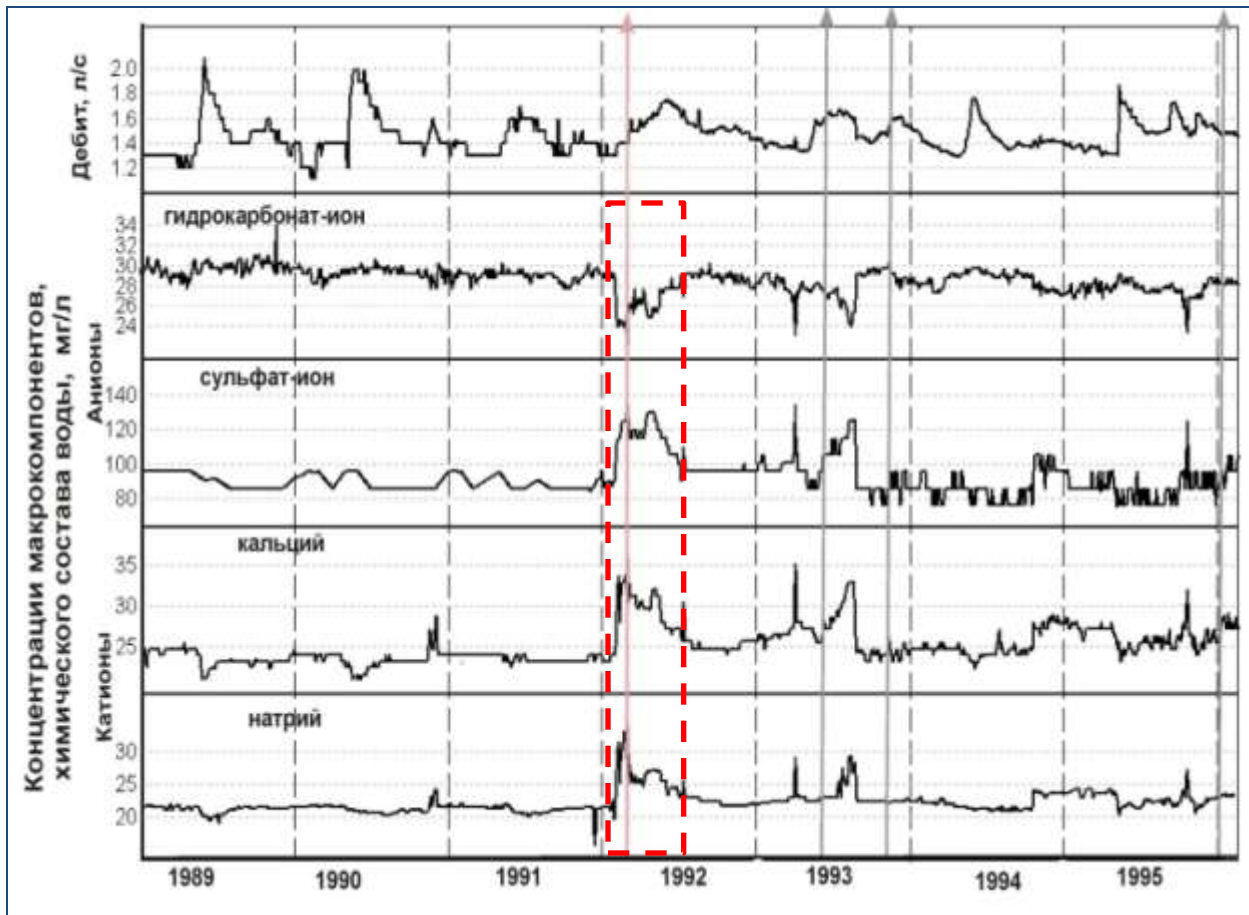


Рис. 3. Проявления различных типов гидрогеосейсмических вариаций в изменениях режима наблюдательных ис-
точников и скважин на территории Петропавловского геодинамического полигона в зависимости от параметров
землетрясений: магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_{cp} , км по данным наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН
в 1977–1997 гг.

По данным наблюдений на Камчатке ГГХП проявлялись перед наиболее сильными землетрясениями: $M=6.6-7.8$, $R=90-350$ км, $M/IgR \geq 3.1$, $I=5-6$ баллов MSK-64, с заблаговременностью 1-9 месяцев.

Камчатка: скважина 1, ст. Морозная, ГХП землетрясения 2.02.1992г., M=6.8.



$M_{0.19} (SO_4^{78} HCO_3^{20}) / (Ca^{56} Na^{44})$ - в фоновых условиях

$M_{0.25} (SO_4^{87} HCO_3^{11}) / (Ca^{55} Na^{45})$ - на стадии формирования ГХП

ГХП землетрясения 02.03. 1992 г., M=6.8, de=135 км:

- увеличение минерализации воды на 30% ,
- изменение гидрогеохимического типа воды за счет относительного увеличения сульфат-иона и уменьшения гидрокарбонат-иона.

Постсейсмический эффект визуально не выражен.

$V=7.3 \text{ м}^3$,
 $Q=1.5-1.3 \text{ дм}^3/\text{с}$,
 $T=1.0-1.6 \text{ ч}$,
 $\Delta t=3 \text{ сут}$
 $\Delta_i=2-10\%$
 $O=1-6\%$

Модель смешивания двух вод с различным химическим составом в зоне повышенной водопроводимости

$$\delta\sigma(t) = \pm \delta\sigma_0 \frac{e^{-t/t_0} - e^{-t/\tau_0}}{(1 - \tau_0/t_0)(\tau_0/t_0)^{t_0/(t_0 - \tau_0)}} + const$$

В [Wang et al., 2004] приводится зависимость изменения концентрации компонента в смешанной (изливающейся) воде во времени при резком изменении гидродинамических условий и процесса смешивания двух вод в питающей водоносной системе:

$\delta\sigma(t)$ – изменение концентрации компонента во времени t , мг/л

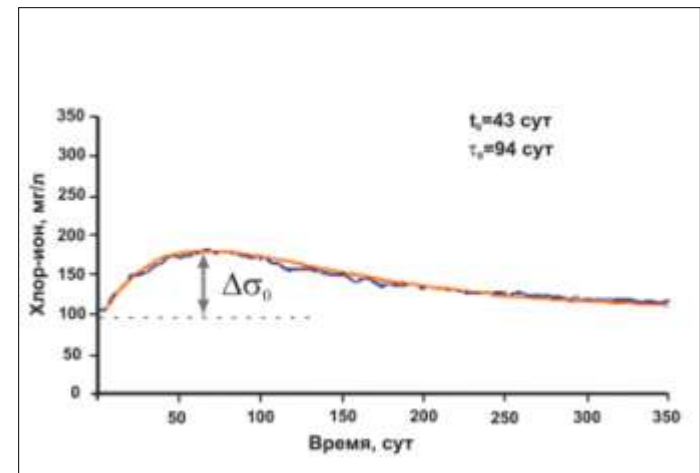
$\pm\delta\sigma_0$ - амплитуда изменения компонента во время развития аномалии, мг/л

t_0 – время релаксации импульса давления в водоносной системе, сут

τ_0 – время движения потока смешанной воды в водоносной системе и в стволе скважины, сут

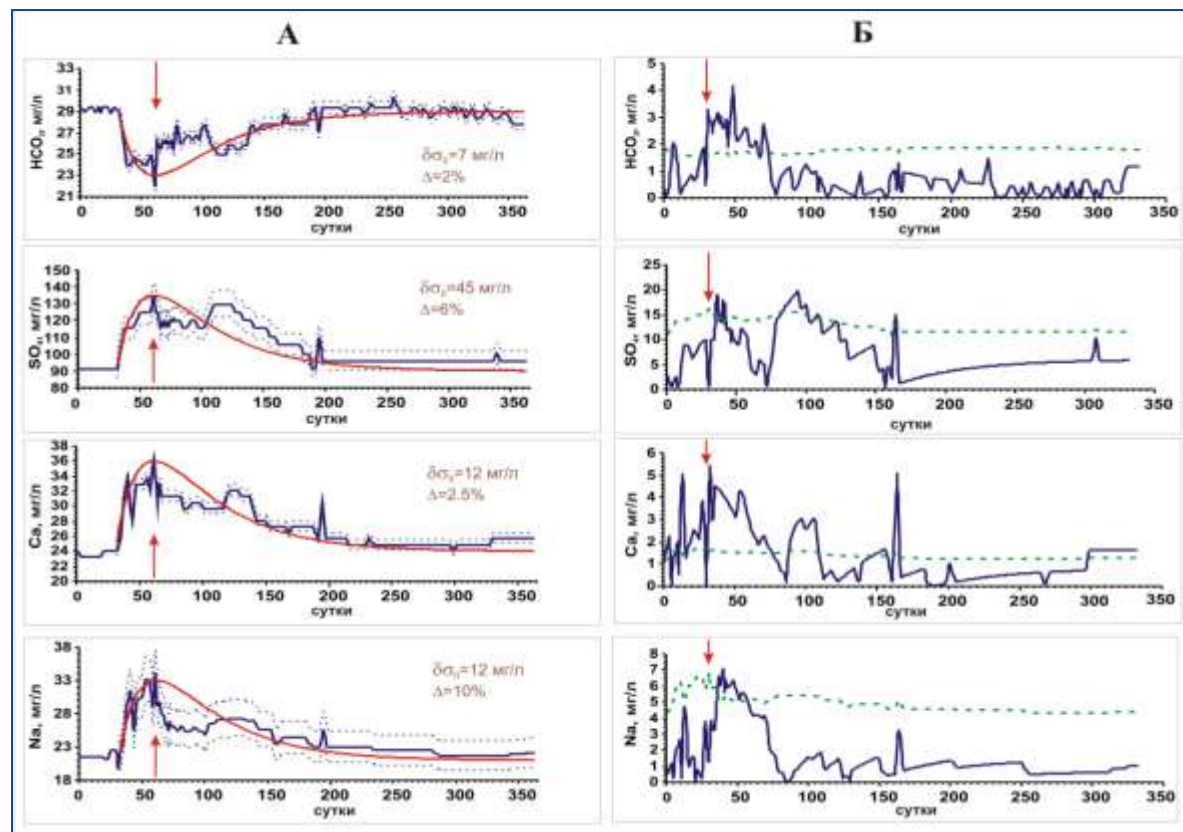
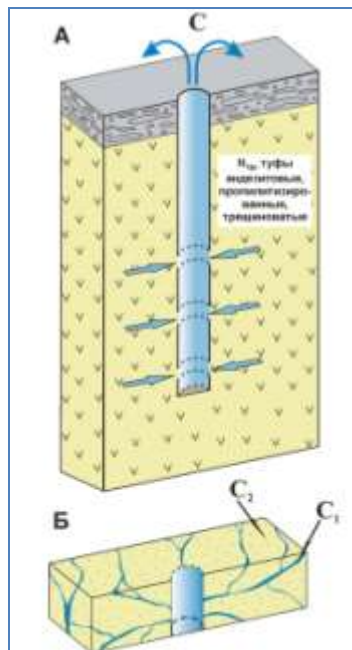
$\delta\sigma_0$ - оценивается по данным наблюдений как амплитуда аномалии.

t_0 и τ_0 - определяются подбором при минимальном расхождении модели и данных наблюдений по всем компонентам состава воды (желательно!), либо по одному компоненту-индикатору.



Результаты моделирования, скв. 1 ст. Морозная [Копылова, Болдина, 2012]

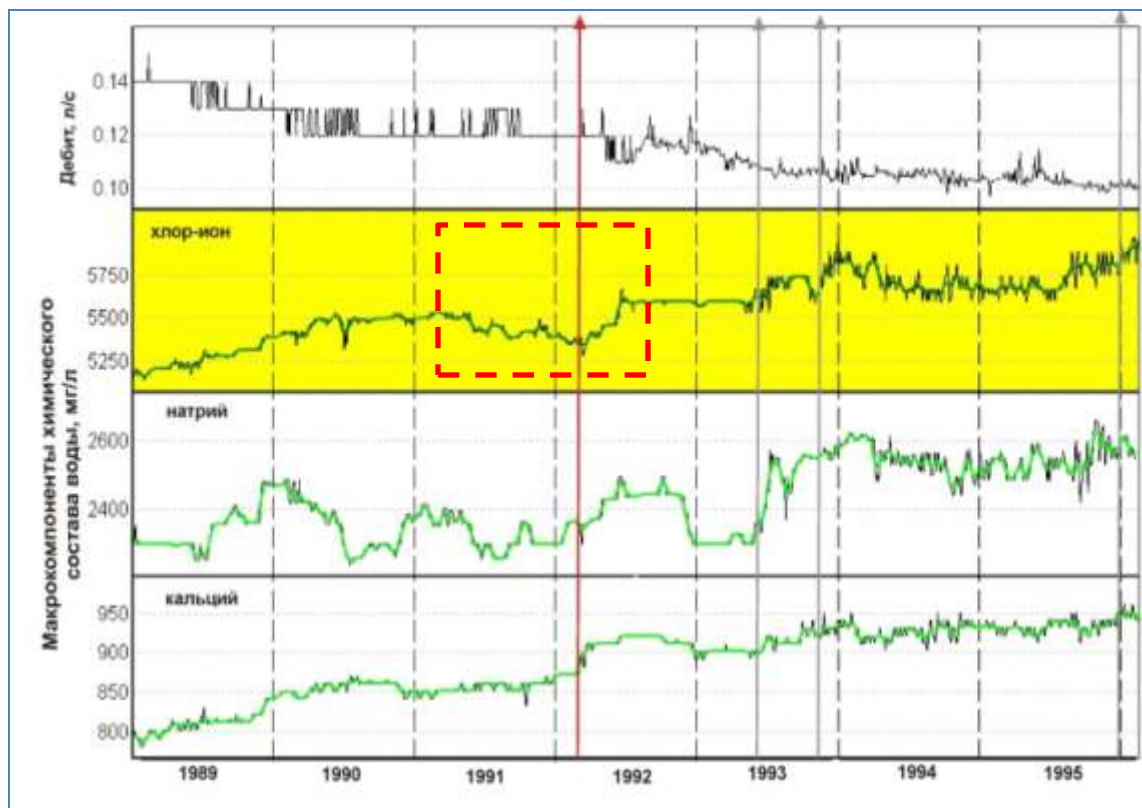
Модель водоносной системы – среда с «двойной пористостью»
[Баренблатт, Желтов, 1960]



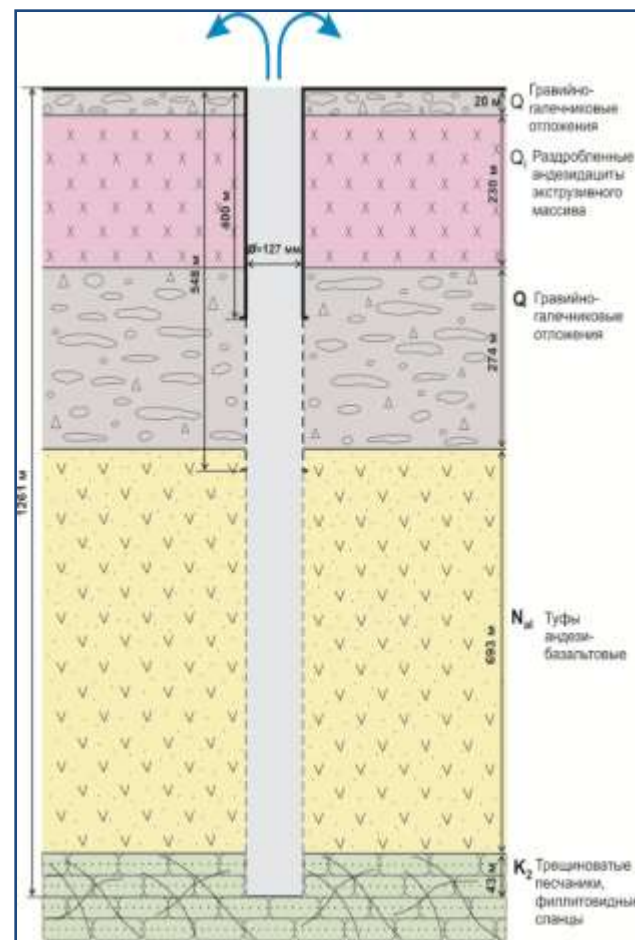
1. Получены величины, характеризующие гидродинамическое состояние водоносной системы скважины при формировании ГГХП; - время релаксации импульса давления $t_0 = 20$ сут и время движения потока смешанной воды $\tau_0 = 50$ сут.
2. Оценены составы и доли двух вод в смешанной воде из скважины в фоновых условиях и при образовании ГГХП:

п:м	Вода C_1	Вода C_2	п':м'	п-доля воды из «трещин» м- доля воды из «блоков»
0.9:0.1	$M_{0.17}(\text{SO}^4_{72}\text{HCO}^3_{25})/(\text{Ca}53\text{Na}46)$	$M_{0.37}(\text{SO}^4_{97}\text{HCO}^3_{2})/(\text{Ca}66\text{Na}34)$	0.6:0.4	
0.87:0.13	$M_{0.17}(\text{SO}^4_{71}\text{HCO}^3_{25})/(\text{Ca}57\text{Na}42)$	$M_{0.34}(\text{SO}^4_{96}\text{HCO}^3_{3})/(\text{Ca}53\text{Na}46)$	0.5:0.5	
0.8:0.2	$M_{0.16}(\text{SO}^4_{71}\text{HCO}^3_{26})/(\text{Ca}56\text{Na}43)$	$M_{0.32}(\text{SO}^4_{90}\text{HCO}^3_{8})/(\text{Ca}54\text{Na}45)$	0.2:0.8	
0.7:0.3	$M_{0.14}(\text{SO}^4_{65}\text{HCO}^3_{31})/(\text{Ca}56\text{Na}43)$	$M_{0.30}(\text{SO}^4_{90}\text{HCO}^3_{8})/(\text{Ca}55\text{Na}44)$	0.2:0.8	

Камчатка: скв. ГК-1, ст. Пиначево, ГГХП землетрясения 2.03.1992г., $M=6.8$



$M_{10} Cl_{98}/(Na_{68} Ca_{27})$



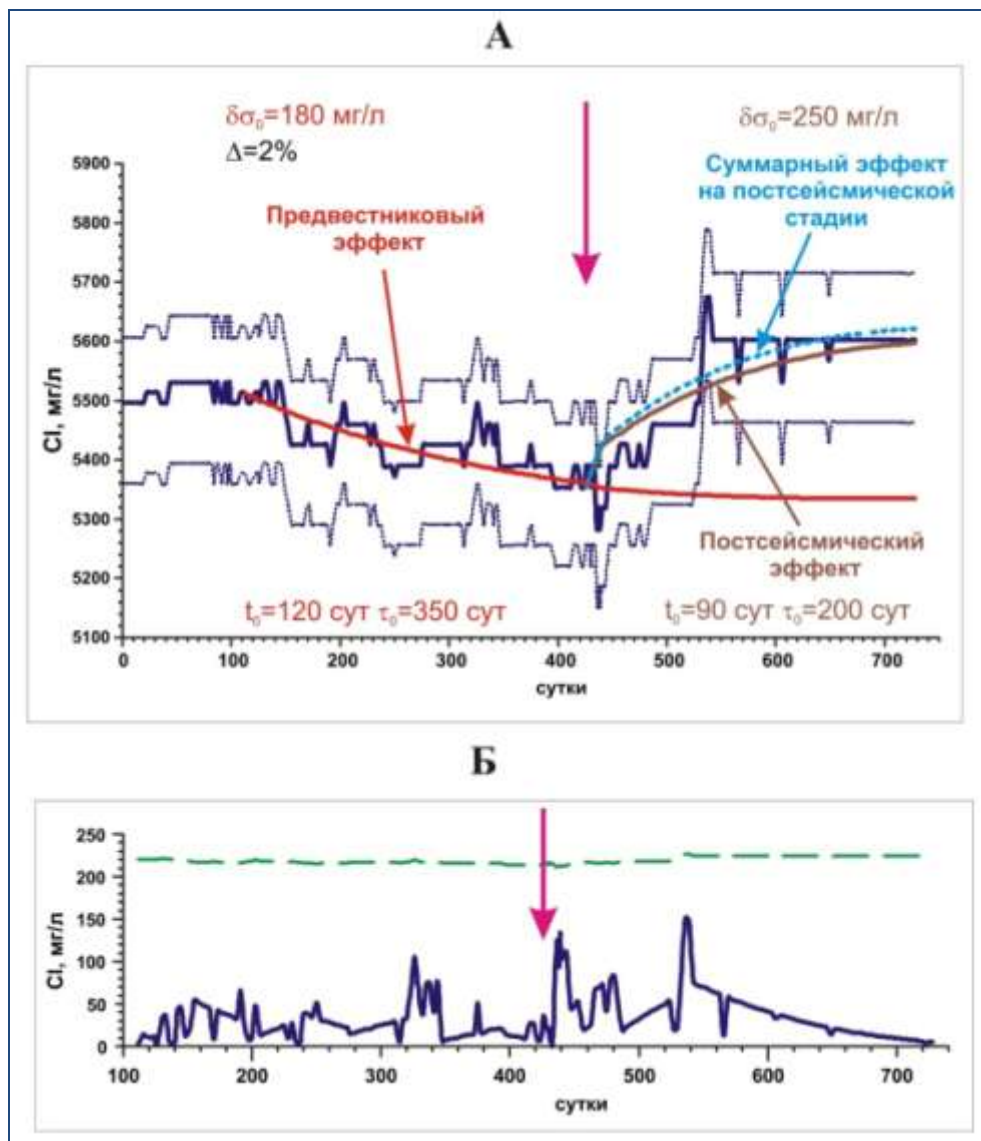
ГГХП землетрясения 2.03.1992 г., $M=6.8$, $de=120$ км:

-относительное уменьшение концентрации хлор-иона (на 180 мг/л или 3% по отношению к фону, разбавление) в течение 9-ти мес.

Постсейсмический эффект: увеличение концентрации хлор-иона и др. макрокомпонентов (концентрирование).

**$V=16.2 \text{ м}^3$
 $Q=0.1 \text{ дм}^3/\text{с}$
 $T=1.9 \text{ сут}$
 $\Delta t=3 \text{ сут}$
 $\Delta C_{Cl} = 2\%$**

Результаты моделирования ГГХП и постсейсмического эффекта по изменениям концентрации хлор-иона в воде скважины ГК-1, ст. Пиначево



АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С КАМЧАТСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$)

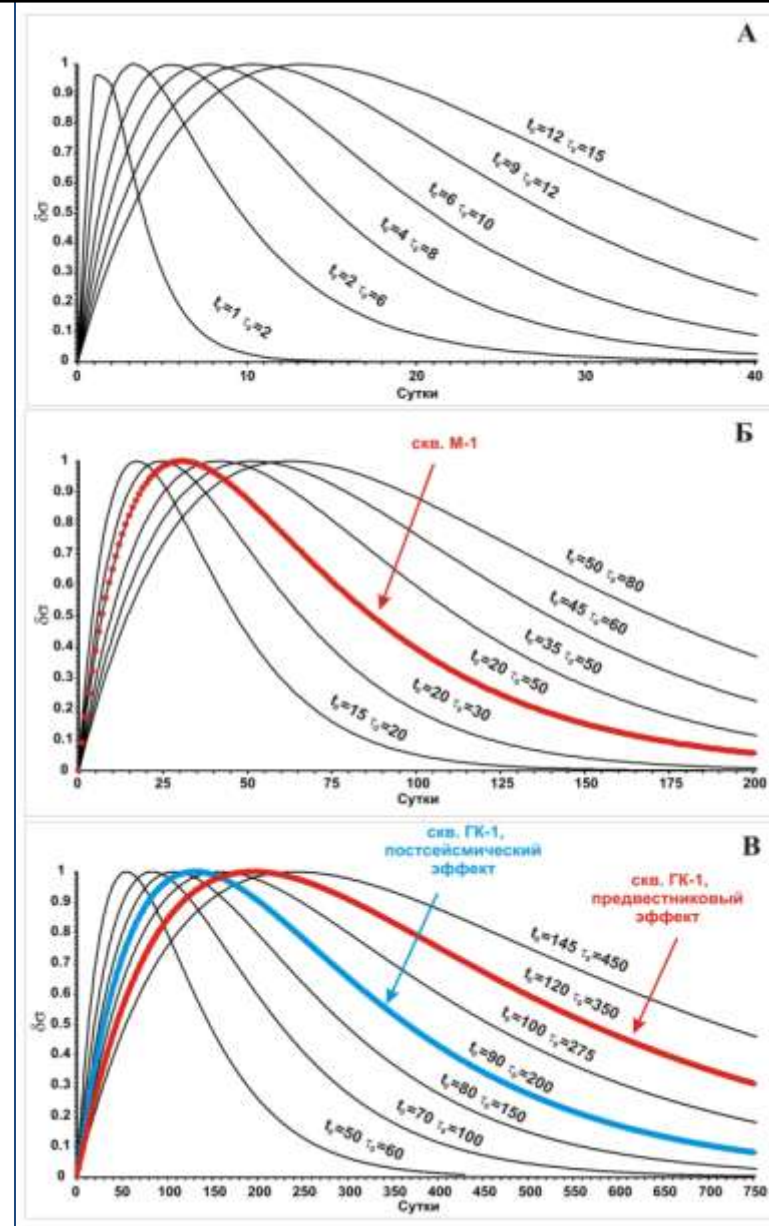
© 2012 г. Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

На основе достоверных данных о ГГХП и модели [Wang et al., 2004] могут оцениваться параметры возмущенного гидродинамического состояния водоносной системы на стадии подготовки З: t_0 - время релаксации давления и τ_0 - время движения потока смешанной воды в водоносной системе скважины. Соотношение этих параметров определяет форму и продолжительность гидрогеохимической аномалии.

Важным для практического выделения ГГХП является соотношение между амплитудой аномалии $\delta\sigma_0$ и Δ - относительной ошибкой химического анализа отдельного компонента. Если $\delta\sigma_0 \leq |(\sigma_2 \pm 0.01\Delta \cdot \sigma_2) - (\sigma_1 \pm 0.01\Delta \cdot \sigma_1)|$, где σ_1 - аналитически определенная фоновая концентрация компонента; σ_2 - экстремальная концентрация на стадии аномалии, то выделение такой аномалии является невозможным.

Если параметры t_0 и τ_0 малы (рис. А), то при большой периодичности отбора проб аномалия может не выделяться, либо представление о ее форме будет искажено (может регистрироваться одиночный «выброс» повышенной концентрации компонента).

Например, ГГХП в скв. 1 (рис. Б, $t_0=20$ сут, $\tau_0=50$ сут) по морфологическим признакам ранее классифицировалась как «скачкообразная» [Копылова и др., 1994; Рябинин, Хаткевич, 2009]. Причиной неверного суждения является относительно «большая» периодичность отбора проб воды $\Delta t=3$ сут, при которой форма ГГХП представлялась в искаженном виде. При этом периодичность наблюдений $\Delta t=3$ сут оказалась достаточной для оценки нормальных «буктообразных» форм ГГХП и постсейсмических эффектов в скв. ГК-1 (рис. В; $t_0=120$ сут, $\tau_0=350$ сут и $t_0=90$ сут, $\tau_0=200$ сут) и изменений концентрации хлор-иона в воде Пиначевского источника 1 ($t_0=34$ -64 сут, $\tau_0=30$ -91 сут) [Копылова, Воронаев, 2006].



УЗБЕКИСТАН

Лаборатория гидрогеосейсмологии Института сейсмологии АН РУз,
заведующий лабораторией д.г.-м.н. Юсупов Ш.С.

Отбор проб воды



Рис. 1. Сейсмогенные зоны, активные разломы, эпицентры землетрясений и наблюдательные станции. 1 – сейсмогенные зоны; 2 – эпицентры землетрясений; 3 – прогностические станции; 4 – разломы земной коры.

По Нурматов, Юсупов и др., 2016

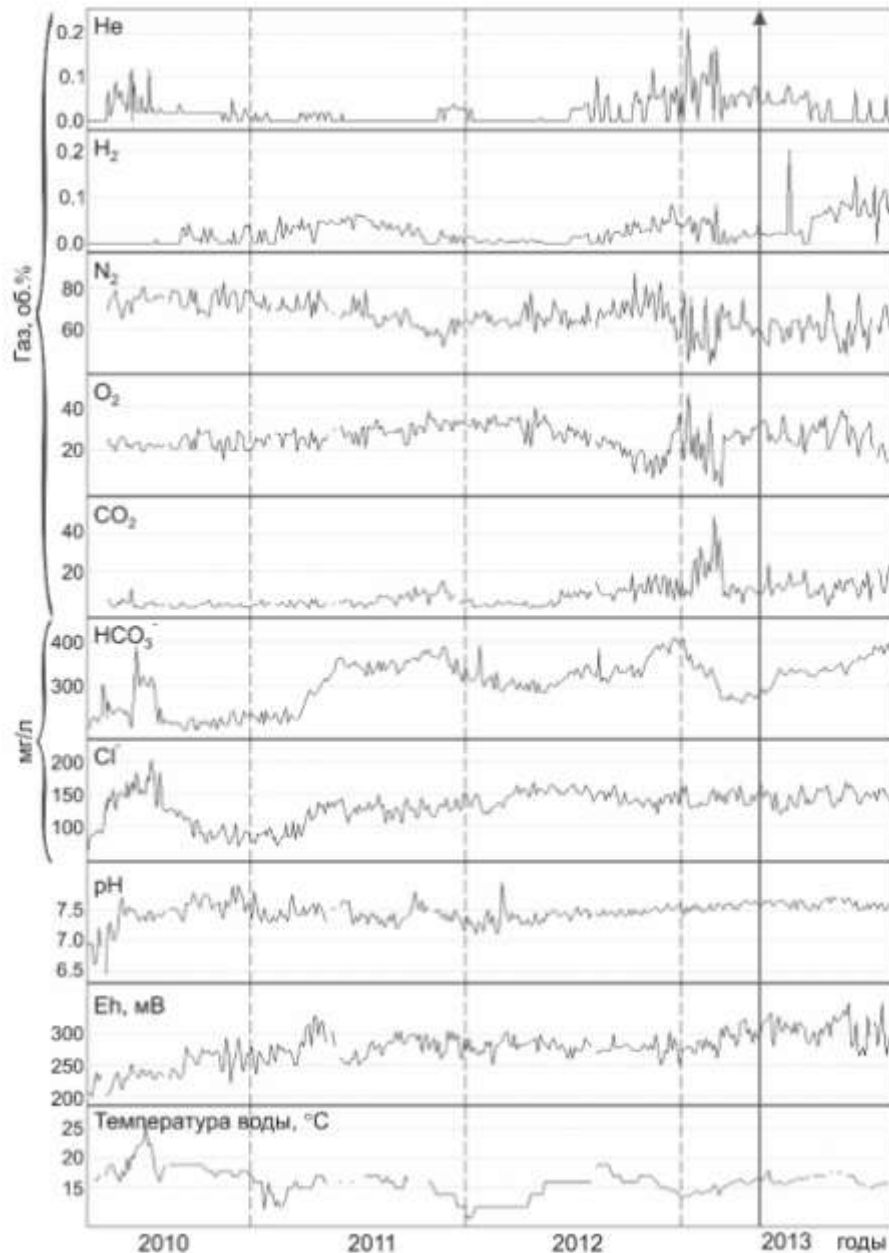


Узбекистан: источник Озодбаш

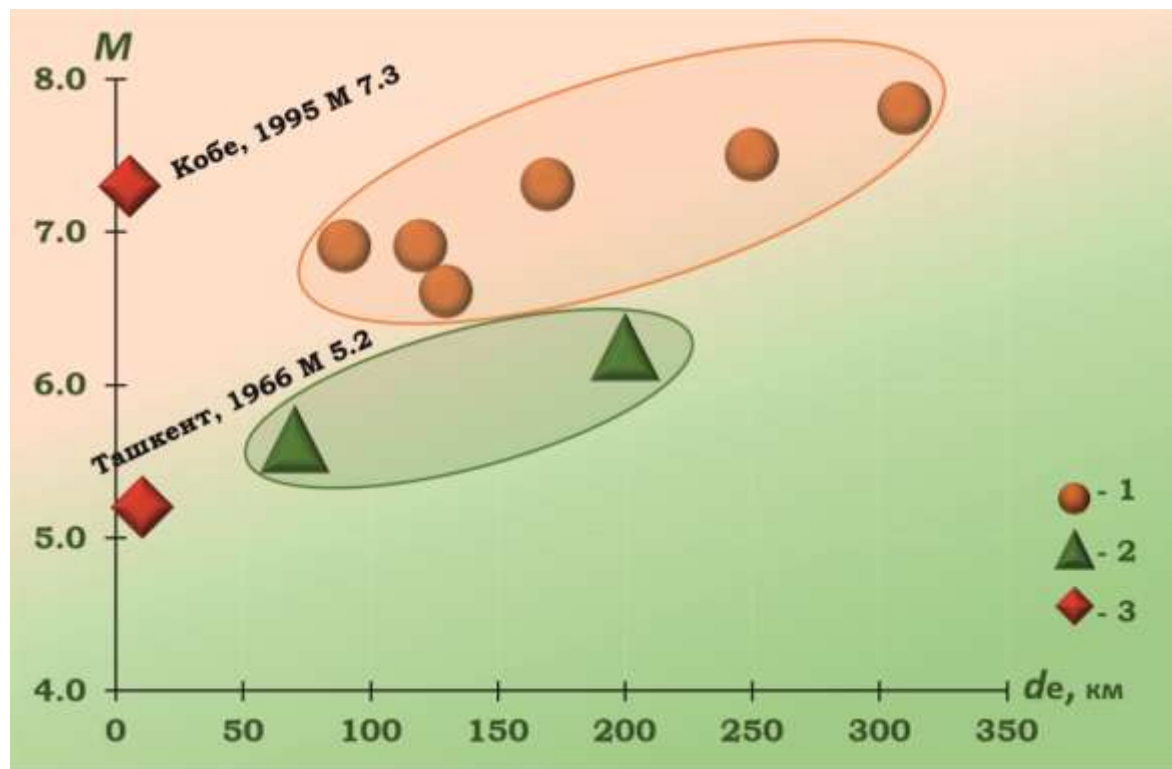
Изменения гидрогеохимических параметров и температуры воды источника Озодбаш в 2010 – 2013 гг. в период землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. , $M = 5.6$ и 6.2 , $d_e = 70$ и 200 км (показаны вертикальной стрелкой).

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 – $17-19^\circ\text{C}$, минерализация воды 1.0–0.7 г/л. Периодичность наблюдений - 2 – 4 суток. Определения концентраций хлора и гидрокарбонат-иона в воде проводились традиционными методами. Состав газа определялся хроматографическим методом.

ГГХП проявлялись перед землетрясениями 25 и 26 мая 2013 г. в изменениях гидрогеохимических параметров, главным образом, в газовом составе (увеличение доли газов He , H_2 , CO_2), росте pH, нарушением карбонатного равновесия и изменением окислительных процессов в подземной воде в течение времени от 2 до 5-9 мес. по различным параметрам. Величины экстремальных значений концентраций достигали 150 – 800% [Юсупов и др., 2014].



Зависимость проявления ГГХП от параметров землетрясений: магнитуды M и эпицентрального расстояния d_e , км



1 – Камчатка, 1977-2004 гг.
2 – Узбекистан, 2010-2013 гг.
3 – другие данные.

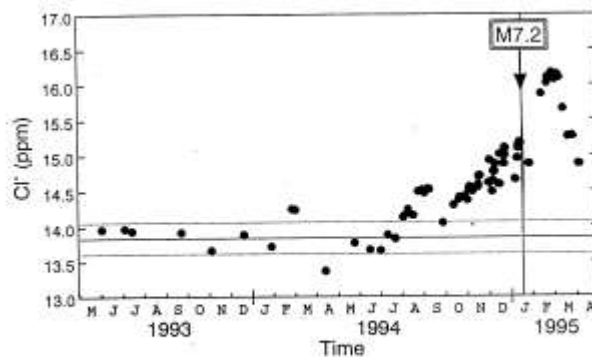


Fig. 6. Precursory chloride ion changes of the 1995 Kobe earthquake (Tsunogi and Wakita, 1995).

Заключение

1. Гидрогеохимические предвестники существуют и проявляются в изменениях химического состава подземных вод и газов на сравнительно небольших расстояниях от области будущего очага (в «ближней» и «средней» зонах, составляющих не более первых единиц длины сейсмогенного разрыва).
2. Традиционный метод поиска ГГХП - трудоемкий и ненадежный, т.к. позволяет получать не более десятков - первых сотен «наблюдений» в год. В обеспечении таких наблюдений задействовано много людей (наблюдатели, химики различного профиля). Качество исходных данных зависит от «человеческого фактора».

В таких условиях, ГГХП могут надежно диагностироваться при очень благоприятных сочетаниях природных условий формирования химического состава наблюдаемой подземной воды и методики наблюдений:

- наличие в водоносных системах вод с контрастным химическим составом и газов «глубинного» (невоздушного) генезиса;
- благоприятные сочетания строения водоносных систем и естественного гидродинамического режима наблюдательных скважин и источников для образования контрастных и продолжительных (десятки суток) аномалий в химсоставе смешанной воды и газа ;
- необходимость качественного аналитического определения совокупности всех макрокомпонентов химического состава воды (анионов и катионов).

3. Для развития метода в целях использования ГГХП при прогнозировании сильных землетрясений необходимо внедрять автоматизированные системы наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках за интегральными показателями химсостав подземных вод (электропроводность, соленость, pH, Eh, газосодержание) в совокупности с наблюдениями за температурой воды и гидродинамическими параметрами - давлением и скоростью разгрузки воды и газа. Периодичность наблюдений – минуты; передача данных – в режиме близком к реальному времени. Такие системы имеются!

4. Традиционный метод наблюдений на скважинах может использоваться как вспомогательный для обоснования выбора объектов режимных наблюдений и получения детальной информации о фоновых и аномальных условиях формирования химического состава воды источников и скважин.