Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Сейсмогидрогеологические явления как проявление триггерного воздействия сейсмичности на гидросферу

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Seismohydrogeological phenomena as a trigger effect of seismicity on the hydrosphere

Kopylova Galina, Boldina Svetlana

Сейсмогидрогеологические явления представляют разнообразные изменений давления, разгрузки, температуры и химического состава подземных вод. Они вызываются:

1 - вариациями статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений (*проявляются в косейсмических скачках давления воды*);

2 - динамическим воздействием сейсмических волн (*проявляются в разнообразных изменениях давления и химического состава подземных вод и газов*);

3 - **процессами подготовки землетрясений (*гидрогеологические предвестники*)**.

Исследование пространственно-временной структуры проявления гидрогеологических предвестников и их связи с параметрами последующих землетрясений позволяет (1) определить значение гидрогеологического метода для сейсмического прогнозирования и (2) рассматривать процессы формирования гидрогеологических предвестников в рамках концептуальных моделей.

Работы 2019-2022 гг., обобщающие данные о гидрогеологических предвестниках и других сейсмогидрогеологических явлениях:

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 (в печати).

Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А. **Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Geodynamics & Tectonophysics – 2022**. V. 13. Is. 2.

Kopylova, G.; Boldina, S. **Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021, 11, 731.**

Kopylova G. and Boldina S. **Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Frontiers in Earth Science: Solid Earth Geophysics. – 2020**.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. **Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. - 2020**. *- № 4. - С. 102-122.*

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.*

Копылова Г.Н., Болдина С.В. **Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977-2017 гг. // Вулканология и сейсмология. - 2019.** - № 2. С. 3 – 20.

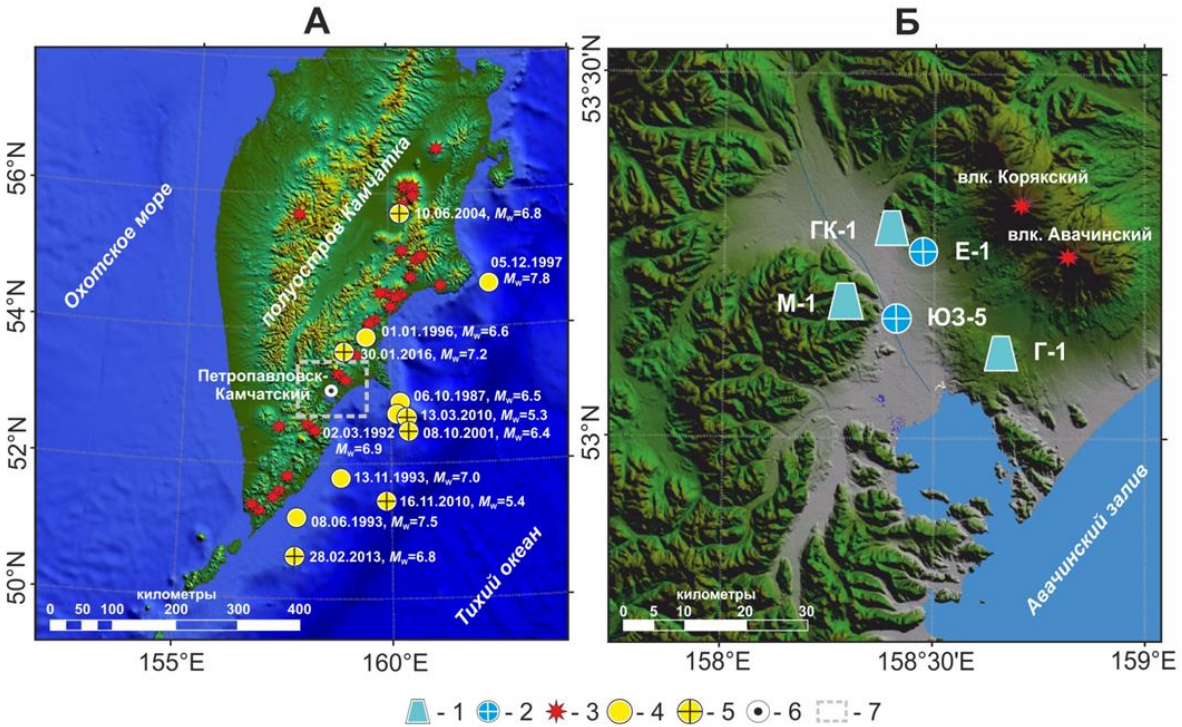
Содержание доклада:

1 – *гидрогеологические предвестники и их связь с параметрами землетрясений (<u>на примере п-ова Камчатка</u>, Узбекистана, Северной Исландии и Японии)*

2 - концептуальная модель формирования гидрогеохимических предвестников (на примере скважины М-1, п-ов Камчатка);

3 – о спецвыпуске статей «Как землетрясения воздействуют на подземные воды?» в журнале Water издательства MDPI.

Полуостров Камчатка, наблюдения КФ ФИЦ ЕГС РАН



1. Наблюдения за параметрами подземных вод проводятся на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона более 40 лет (начало наблюдений на отдельных скважинах с 1977 - 1997 гг., ряды наблюдений составляют 45 – 25 лет).

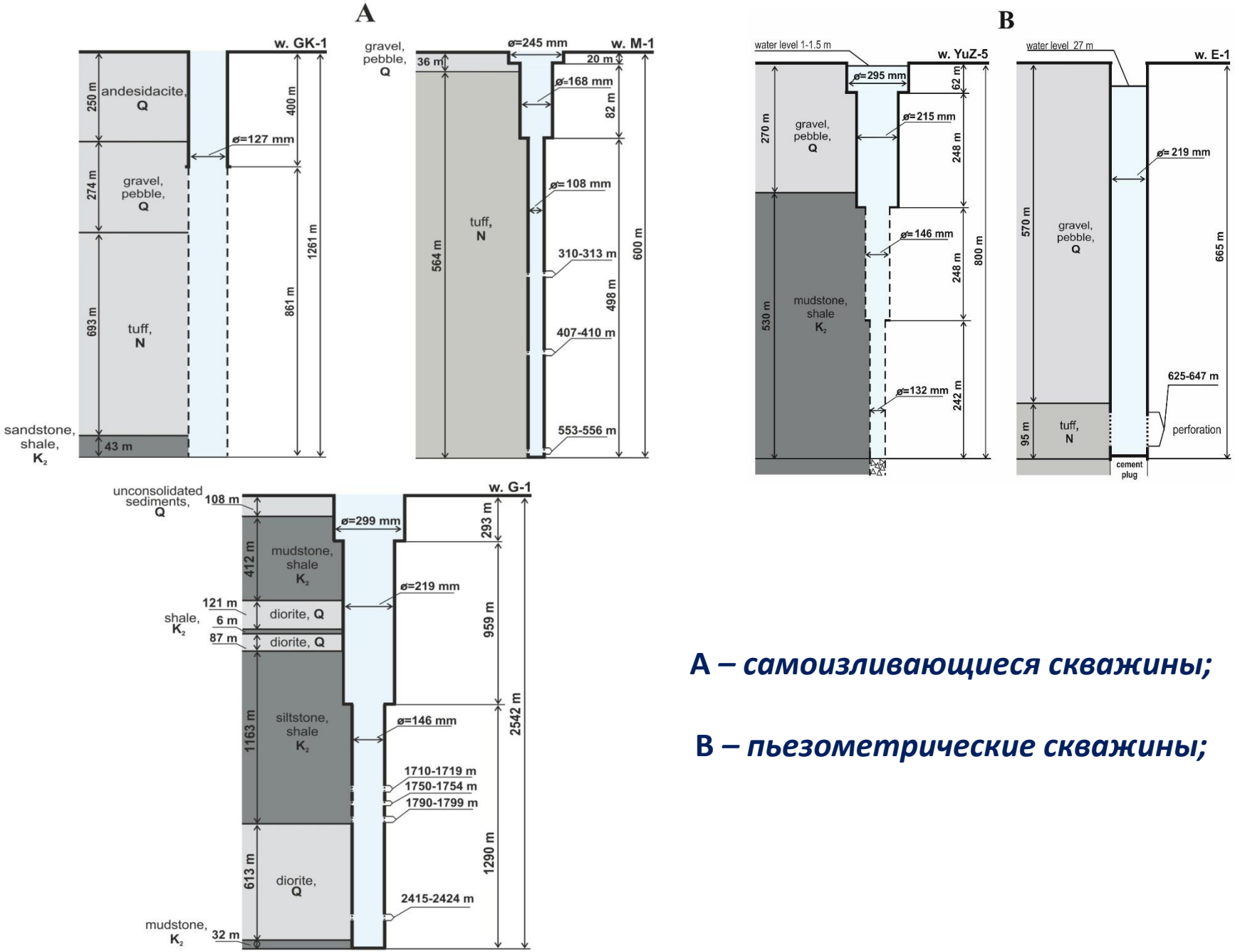
История развития сети, методики исследований и основные результаты см. ***Копылова Г.Н., Болдина С.В.*** **Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977-2017гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. №2.**

2. Гидрогеологические предвестники <u>*неоднократно*</u> проявлялись в пяти скважинах в течение времени 1-9 месяцев перед землетрясениями с M_w=6.5 - 7.8 на эпицентральных расстояниях d_e = 80 – 300 км.

С 2002 г. мы сотрудничаем с КФ РЭС и подаем регулярные заключения о наличии/отсутствии предвестников в изменениях уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5. Ряд прогнозов землетрясений признаны успешными. См. публикацию: ***Kopylova G.. Boldina S.*** **Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Frontiers in Earth Science: Solid Earth Geophysics. – 2020.**

.

Строение наблюдательных скважин, в которых неоднократно проявлялись предвестники



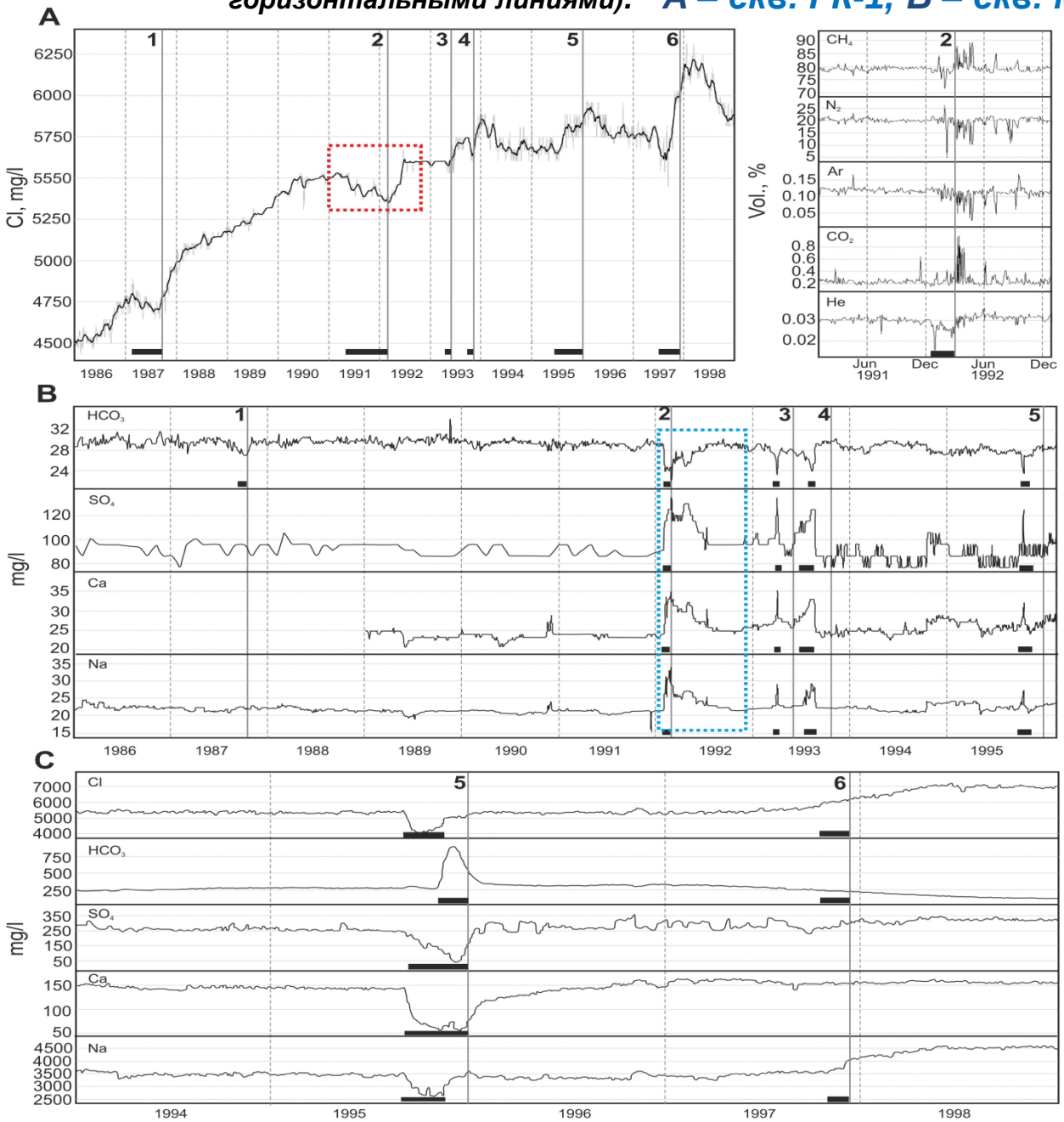
A – *самоизливающиеся скважины;*

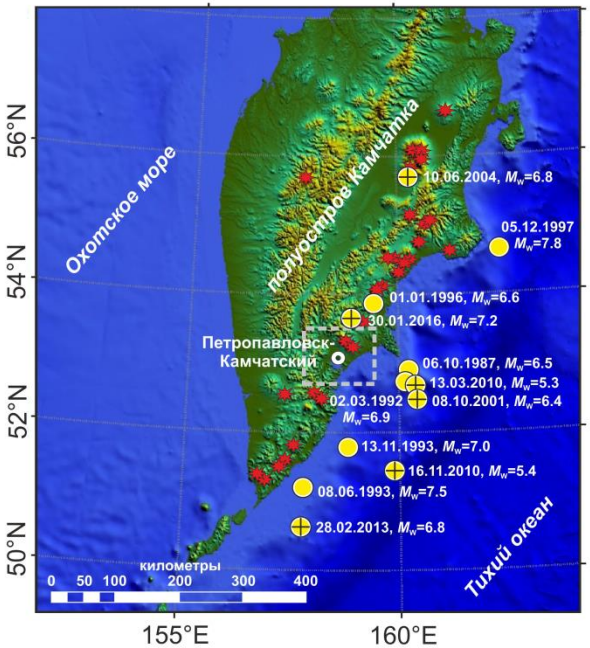
B – *пьезометрические скважины;*

Данные о наблюдательных скважинах, в которых неоднократно проявлялись ГП

Скважина	Координаты	Глубина, м Открытый интервал, м	Литология: возраст, состав	Дебит, q, дм^3/с; Уровень воды, h, м	Температура воды, °C	Минерализация воды, г/дм^3	Тип воды	Состав газа	Наблюдения: время, периодичность
ГК-1	53.28°N 158.40°E	1261 **400–1261**	Q, N, K_2, туфы, алевролиты, сланцы	изливающаяся, q=0.1	16	10	Cl–Na–Ca	свободный газ, CH_4–N_2	**1986–1998**, 3 суток
М-1	53.18°N 158.28°E	600 **310–313** **407–410** **553–556**	N, туфы	изливающаяся, q=1.5	16	0.25	SO_4–Ca–Na	растворенный газ, N_2	
Г-1	53.05°N 158.66°E	2500 **1710–1719** **1750–1754** **1790–1799** **2415–2424**	Q, K_2, диориты, сланцы	изливающаяся, q<0.001	10	12	Cl–Na	свободный газ, CH_4–N_2	
Е-1	53.26°N 158.48°E	665 **625–645**	N, туфы	пьезометрическая, h=28	10	1.5	Cl–HCO_3–Na	свободный газ, N_2–CH_4	**1987–2016**: 03.01.1987–08.07.1994, 1 сутки; 29.01.1996–2016, 5–10 минут
ЮЗ-5	53.17°N 158.41°E	800 **310–800**	K_2, аргиллиты, сланцы	пьезометрическая, h=1.5	14	0.45	HCO_3–SO_4–Na–Ca	растворенный газ, N_2	**09.09.1997–2016,** 5–10 минут

Проявления гидрогеохимических предвестников в 1986-1998 гг (выделены жирными горизонтальными линиями): А – скв. ГК-1, В – скв. М-1, С – скв. Г-1

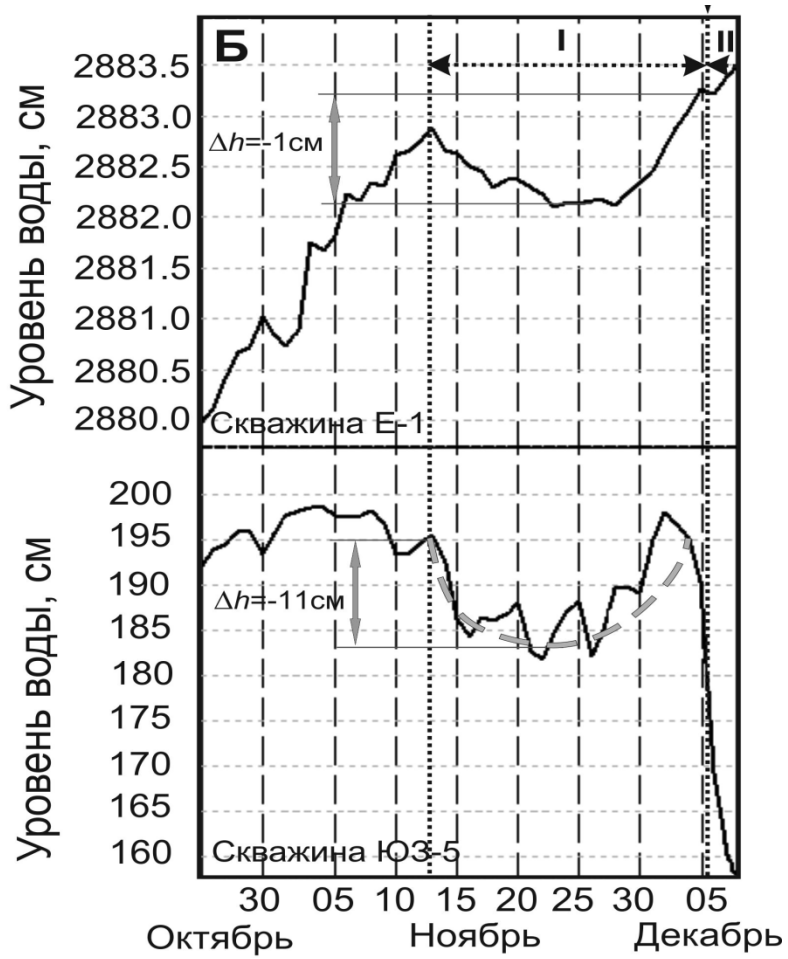




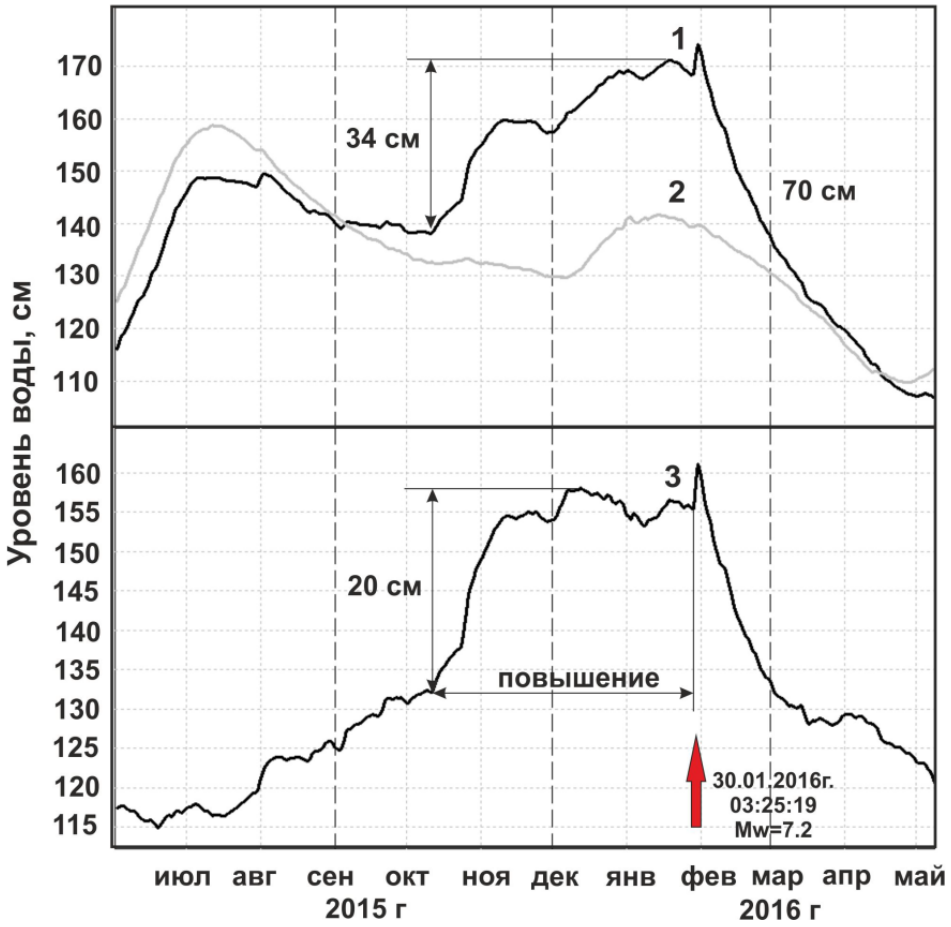
Землетрясения	№	дд.мм.гггг	M_w	d_e, km
	1	06.10.1987	6.5	130–134
	2	02.03.1992	6.9	133–136
	3	08.06.1993	7.5	220–233
	4	13.11.1993	7.0	157–167
	5	01.01.1996	6.6	95–108
	6	05.12.1997	7.8	305–314
	7	30.01.2016	7.2	70–80

Проявление гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997г., M_w =7.8 (слева) и Жупановским землетрясением 30.01.2016г., M_w =7.2 (справа) (выделены ретроспективно)

Кроноцкое землетрясение, 05.12.1997г., M=7.8, H=33 км, d_e= 300(200) км, скважины Е-1 и ЮЗ-5

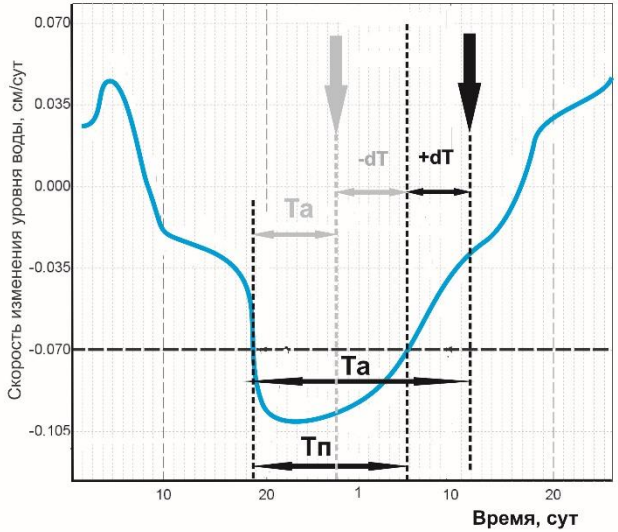


Жупановское землетрясение, 30.01.2016г., M=7.2, H=180 км, d_e=80 км, скв. ЮЗ-5



Скважина Е-1: Гидрогеодинамический предвестник Жупановского землетрясения, Mw=7.2, de=80 км, выделенный в реальном времени (Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения… // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4)

Схема гидрогеодинамического предвестника



Тп – продолжительность предвестника,
Та – заблаговременность предвестника,
dT – время от окончания предвестника до момента землетрясения
Вертикальные стрелки – возможные моменты землетрясений
(черная - ≈90% случаев , серая - ≈10%).
Вероятность связи предвестника и землетрясений с M≥5.8 P=0.79.

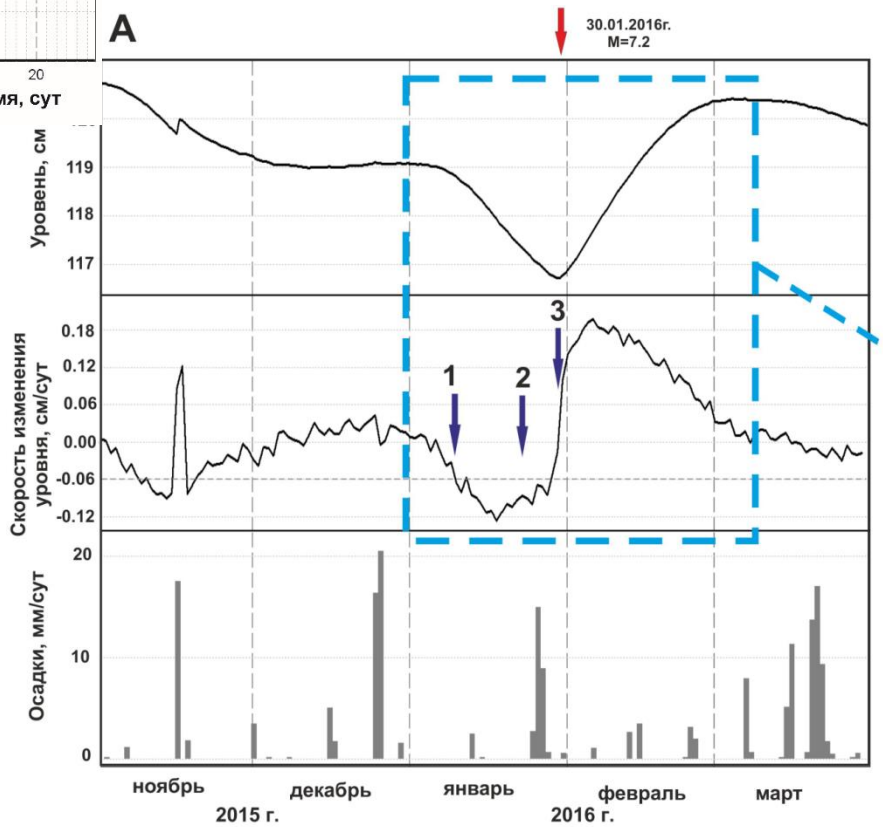
Изменения уровня воды и его суточной скорости в сентябре 2015 – апреле 2016 гг., скв. Е-1:

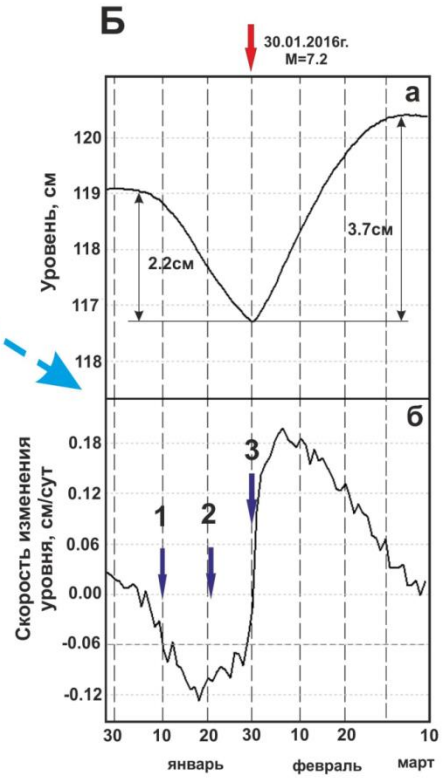
Стрелками показано:
1 - начало аномалии,

2 – дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС 21.01.2015 г.,

3 - момент ЖЗ 30.01.2016 г., M_w= 7.2, d_e= 80км.

Пунктирная линия - пороговое значение суточной скорости понижения уровня воды.





Землетрясения, которым предшествовали гидрогеологические предвестники <u>в 2-4 скважинах</u>

*(**https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/**; http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php)*

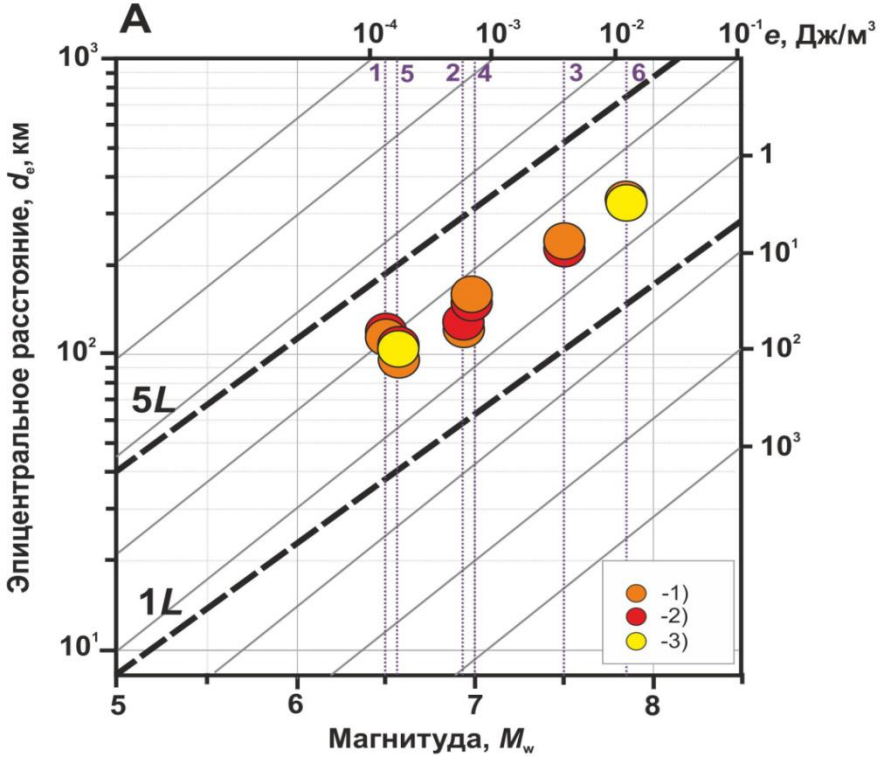
№	Дата, дд.мм.гггг	Эпицентр землет-рясения	Глу-бина H, км	Магни-туда M_w	Длина очага землетря-сения(1) L, км	Эпицент-ральное расстояние до скважин d_e, км	d_e/L	Удельная плотность сейсмической энергии e, Дж/м^3 (2)	Интен-сивность по шкале MSK-64	Скважины (T_1 / T_2(3), недели)
1	06.10.1987	52.86ºN 160.23ºE	33	6.5	**37**	130–134	**3.5–3.7**	**0.1**	**5**	ГК-1 (**30/30**), М-1 (**4/4**), Е-1(2)(**5/5**)
2	02.03.1992	52.76ºN 160.20ºE	20	6.9	**56**	133–136	**2.4**	**0.2**	**5–6**	ГК-1 (**39/39**), М-1 (**4/4**), Е-1 (**9.5/9.5**)
3	08.06.1993	51.20ºN 157.80ºE	40	7.5	**103**	220–233	**2.1–2.3**	**0.3**	**5**	ГК-1 (**4/4**), М-1 (**4/21.5**), Е-1(2)(**36/36**)
4	13.11.1993	51.79ºN 158.83ºE	40	7.0	**62**	157–167	**2.5–2.7**	**0.1–0.2**	**5–6**	ГК-1 (**4/4**), М-1 (**4/17**), Е-1 (**12/12**)
5	01.01.1996	53.88ºN 159.44ºE	0	6.6	**41**	95–108	**2.3–2.6**	**0.1–0.2**	**4–5**	ГК-1 (**30/30**), М-1 (**4/13**), Г-1 (**21.5/21.5**)
6	05.12.1997	54.64ºN 162.55ºE	10	7.8	**139**	305–314	**2.2-2.3**	**0.3–0.4**	**5–6**	ГК-1 (**21.5/21.5**), Г-1 (**13/13**), Е-1 (**3/3**), ЮЗ-5(**3/3**)
7	30.01.2016	53.86ºN 158.73ºE	168	7.2	**76**	70–80	**0.9-1.1**	**2.7–4.1**	**4**	Е-1 (**3/3**), ЮЗ-5 (**15/15**)

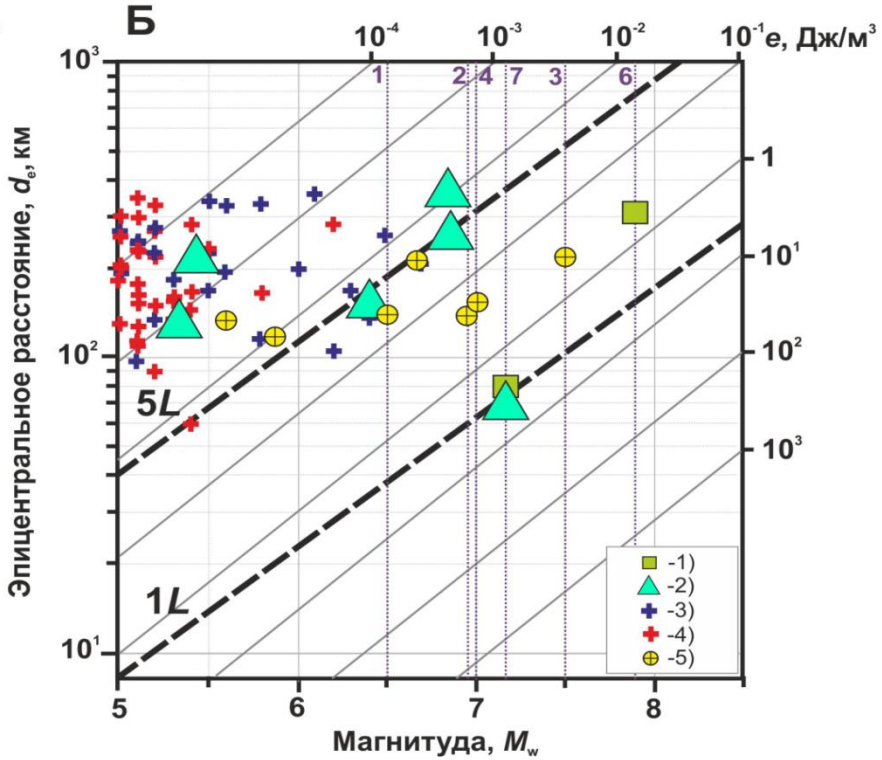
(1) – максимальный линейный размер очага землетрясения $\boldsymbol{lgL = 0.440 \cdot M_w - 1.289}$ (*Ризниченко, 1976*);

(2) – удельная плотность сейсмической энергии $\boldsymbol{lgd_e = 0.48M_W - 0.33lg(e)}$ (*Wang, 2007; Wang, Manga, 2010; Kopylova, Boldina, 2020*);

(3) –длительность предвестника $\mathbf{T_1}$ - продолжительность аномального изменения гидрогеологических параметров, $\mathbf{T_2}$ - заблаговременность предвестника - время от начала аномального изменения гидрогеологических параметров до землетрясения.

Связь гидрогеологических предвестников (А - гидрогеохимических, Б – гидрогеодинамических), проявившихся в 2-4-х скважинах, с параметрами землетрясений - M_w и d_e и величиной плотности сейсмической энергии e; 1L, 5L – один и пять размеров очага в зависимости от величины M_w





Самоизливающиеся скважины: 1) - ГК-1, 2) - М-1, 3) - Г-1

Пьезометрические скважины: 1) - ЮЗ-5, 2) - 5) - Е-1:

2) предвестник выявлен в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для КФ РЭС, и прогноз признан оправдавшимся;

3) – 5) – ретроспективный анализ проявления предвестника перед землетрясениями с M≥5.0, d_e ≤ 350 км в 1987-2012 гг.,

3), 5) - предвестник проявлялся (для событий с M≥6.3 в 100% случаев)

4) предвестник не проявлялся (если рассматривать события с M≤ 6.2, предвестник проявлялся в ≈50% случаев).

Землетрясения	№	дд.мм.гггг	M_w	d_e, km
	1	06.10.1987	6.5	130–134
	2	02.03.1992	6.9	133–136
	3	08.06.1993	7.5	220–233
	4	13.11.1993	7.0	157–167
	5	01.01.1996	6.6	95–108
	6	05.12.1997	7.8	305–314
	7	30.01.2016	7.2	70–80

Kopylova G., Boldina S. (2020) Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. Front. Earth Sci. 8:576017. doi: 10.3389/feart.2020.576017

Результаты обобщения данных по гидрогеологическим предвестникам (по данным наблюдений в скважинах на п-ове Камчатка

1. Получены оценки параметров землетрясений и интенсивности их воздействия при проявлении гидрогеологических предвестников (**ГП**) в нескольких (2-4) скважинах :

M_w = 6.5 - 7.8, d_e = 80 – 300 км **e ≥ 0.1 Дж/м^3 , I_{MSK-64} ≥ 4-6 баллов**

Время проявления ГП перед такими землетрясениями составляло **1-9 мес.**

Скважины, в которых проявлялись ГП, расположены в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений, для которых величины **d_e/L = 1–3.5**, где L – максимальный линейный размер очага землетрясения, км.

2. С 2002 г. в сотрудничестве с КФ РЭС проводится эксперимент по использованию **ГП** для прогнозирования землетрясений в реальном времени путем составления еженедельных заключений о наличии/отсутствии ГП по текущим данным наблюдений за изменениями уровня/давления подземных вод.

По заключениям КФ РЭС были успешно спрогнозированы шесть землетрясений с M = 5.3 – 7.2, из которых четыре события имели величины магнитуд 6.4 – 7.2.

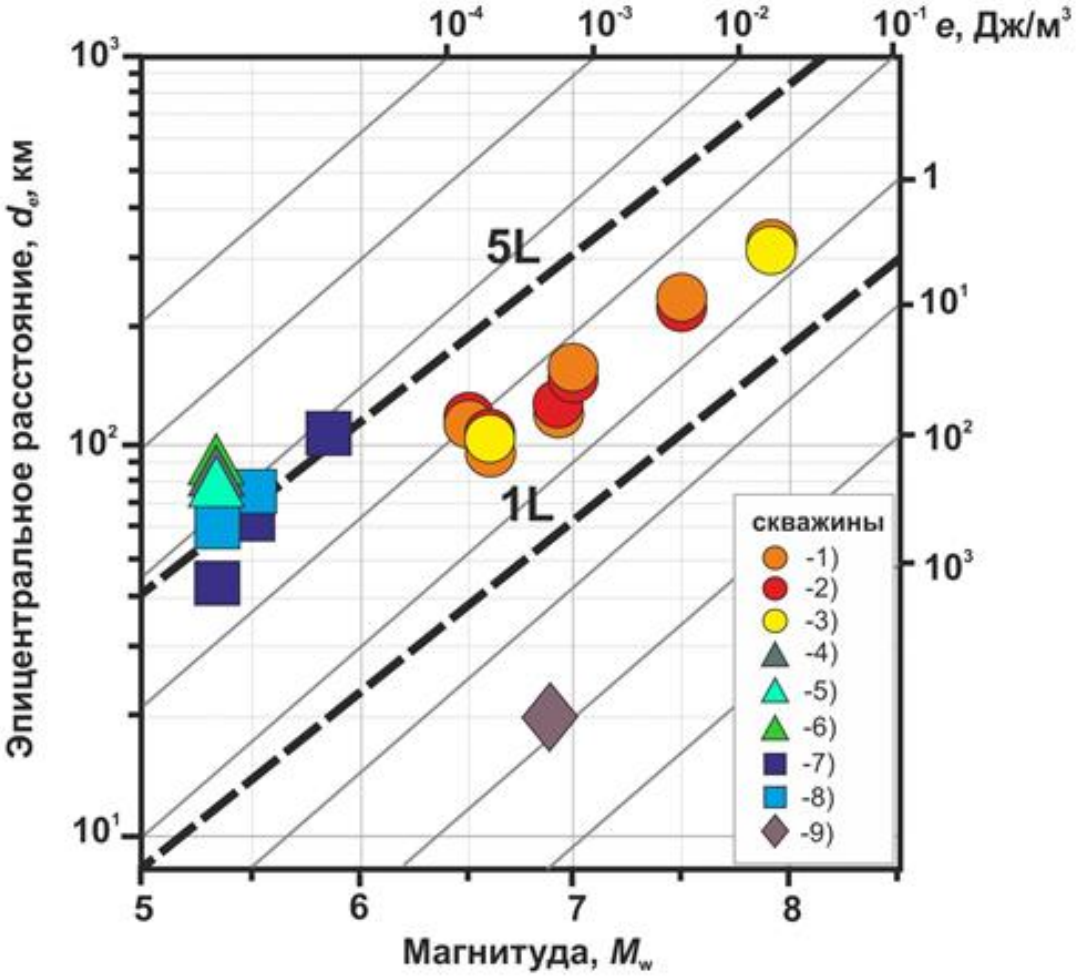
Перед землетрясением 16 марта 2021 г., $Mw=6.6$, d_e=350 км в изменениях давления воды в скважине Е-1 предвестник выявлен в реальном времени.

Гранты и благодарности

Работы выполнялись при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Мировые данные <u>о гидрогеохимических предвестниках</u> в ионно-солевом составе подземных вод :

10 скважин из четырех регионов, 11 землетрясений с M_w = 5.3 - 7.8, d_e = 20 – 300 km



1-3 – скважины Камчатки (6 EQ)
4-6 – скважины в Узбекистане (1EQ)
7-8 – скважины Северной Исландии (3 EQ)
9 – скважина ROC в Японии (1 EQ)

Earthquake data:
M_w = 5.3 – 7.8
d_e = 20 – 308 km
d_e/L = 0.4 – 8.1 (**≤5**)

e = 0.003 – 66.5 J/m^3
I_{MSK-64} ≥ 4 points (4-8)

Концептуальная модель гидрогеохимических предвестников в изменениях ионного состава подземной воды

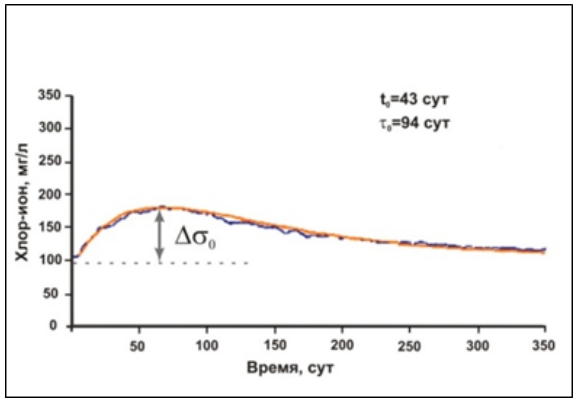
(Wang et al., 2004; Копылова, Воропаев, 2006; Копылова, Болдина, 2012; Kopylova, Boldina, 2021)

Основывается на представлении о смешивании двух вод с различным химическим составом в зоне повышенной проводимости при изменении гидродинамических условий в водоносной системе

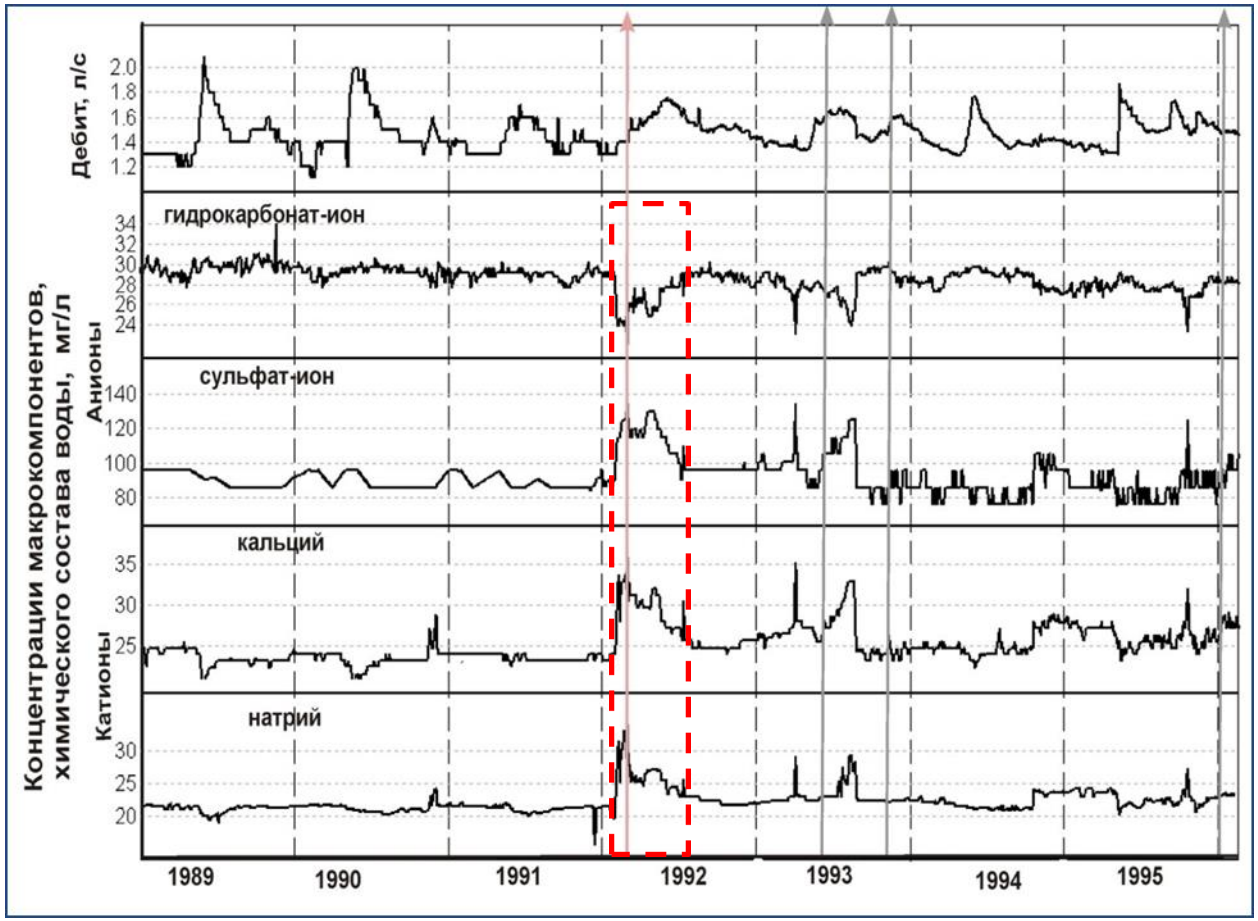
$$\delta\sigma(t) = \pm\delta\sigma_0 \frac{e^{-t/t_0} - e^{-t/\tau_0}}{(1-\tau_0/t_0)(\tau_0/t_0)^{\tau_0/(t_0-\tau_0)}}$$

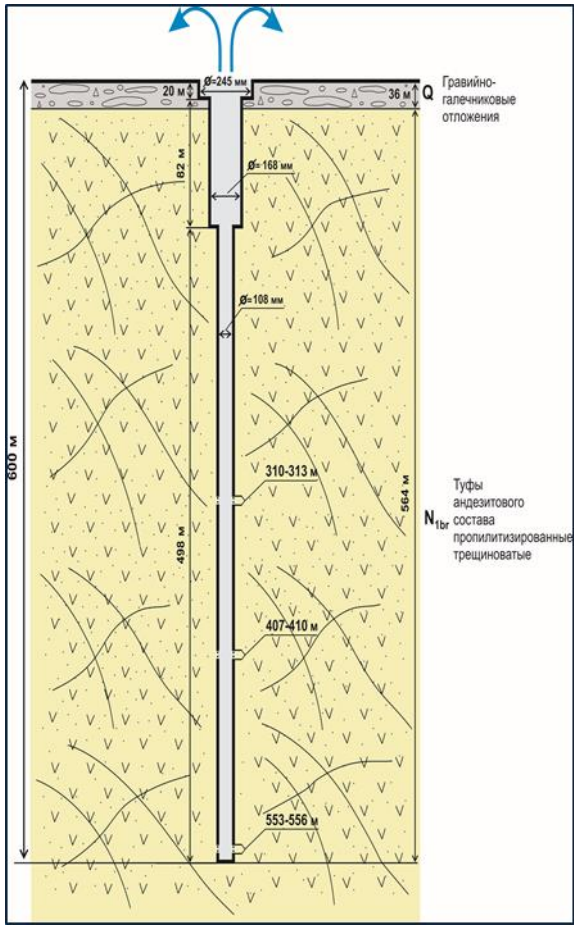
$\delta\sigma(t)$ – изменение концентрации индикаторного компонента (ИК) в смешанной воде во времени t,мг/л
$\pm\delta\sigma_0$ - амплитуда изменения концентрации ИК в течение развития аномалии, мг/л
t_0 – время релаксации импульса давления в водоносной системе, сут
τ_0 – время движения потока смешанной воды в водоносной системе и в стволе скважины, сут.

С использованием данных наблюдений гидрогеохимического предвестника можно оценить **параметры возмущенного гидродинамического состояния водоносной системы t_0, τ_0 :**
$\pm\delta\sigma_0$ оценивается по наблюденным данным как амплитуда аномалии ИК.
t_0, τ_0 определяются при минимальном расхождении между моделью (red line) и наблюденными данными (blue line) для всех компонентов ионного состава воды или для одного индикаторного компонента.



Временные ряды гидрогеохимических наблюдений, скв. М-1, Камчатка, 1989-1996. Красным прямоугольником выделена аномалия в связи с землетрясением 2 марта 1992 г., М=6.9





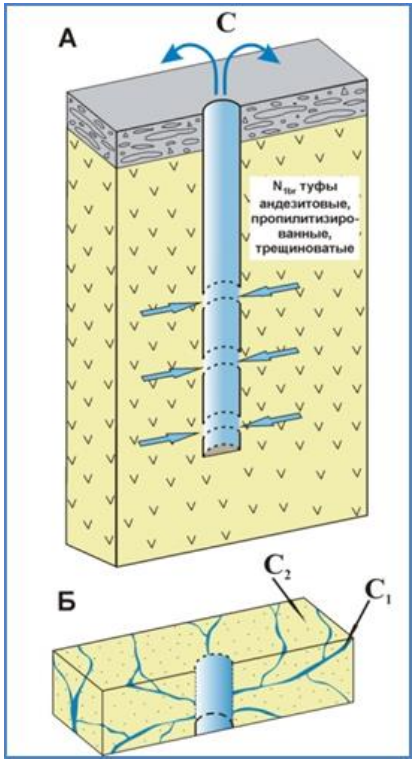
Гидрогеохимический предвестник в течение 28 сут до ЕQ:

- увеличение минерализации воды на 30% ,

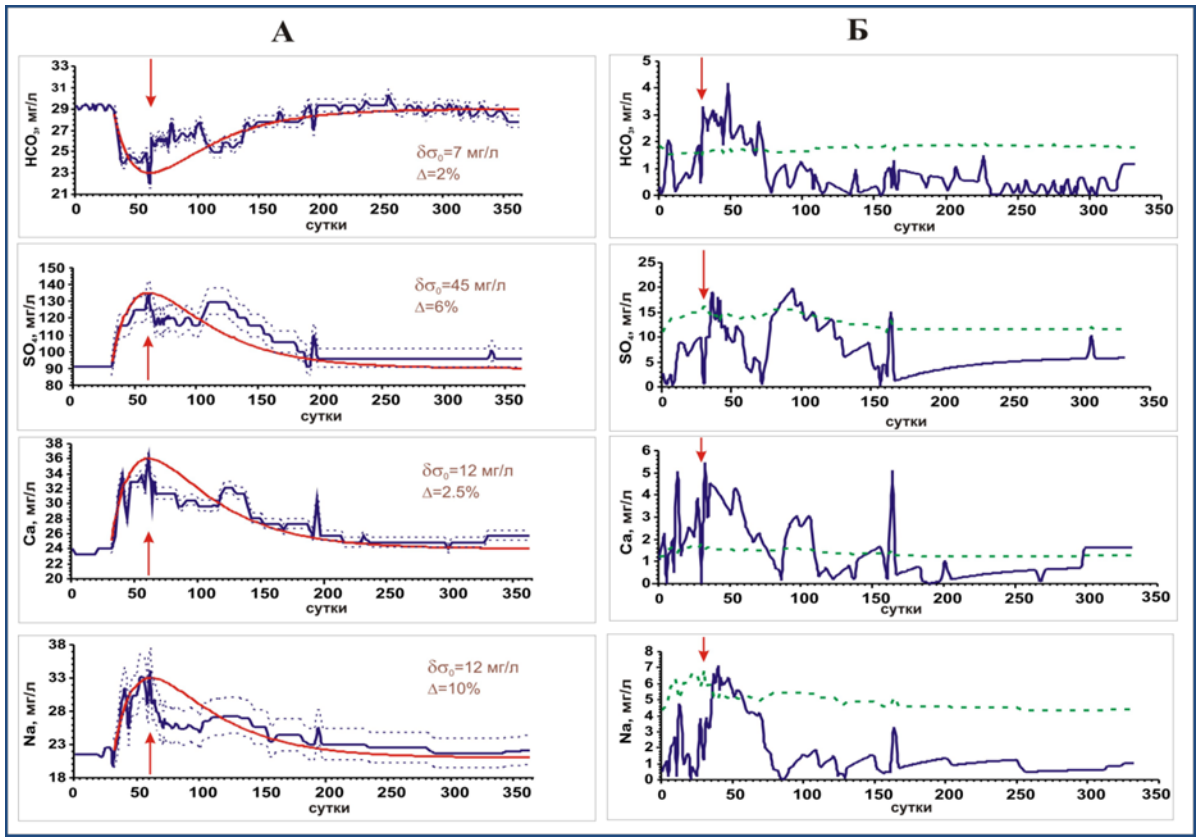
- изменение гидрогеохимического типа воды за счет относительного увеличения концентрации сульфат-иона и уменьшения гидрокарбонат-иона.

V=7.3 м^3,
Q=1.5-1.3 дм^3/с,
T=1.0-1.6 ч,
Δt=3 сут
Δ_i=2-10%
O= 1-6%

Результаты расчетов и моделирования



C1<C2



1. Получены параметры гидродинамического состояния водоносной системы в течение развития гидрогеохимического предвестника: время релаксации импульса давления t_0 = 20 сут и время движения потока смешенной воды τ_0 = 50 сут.

2. Рассчитаны составы и соотношения двух контрастных вод в смешанной воде из скважины в фоновых условиях и при формировании гидрогеохимического предвестника

n:m	Water C_1	Water C_2	n':m'	
0.9:0.1	$M_{0.17}(SO^{4}72HCO^{3}25)/(Ca53Na46)$	$M_{0.37}(SO^{4}97HCO^{3}2)/(Ca66Na34)$	0.6:0.4	n- вода из «трещин“
0.87:0.13	$M_{0.17}(SO^{4}71HCO^{3}25)/(Ca57Na42)$	$M_{0.34}(SO^{4}96HCO^{3}3)/(Ca53Na46)$	0.5:0.5	m- вода из «блоков»
0.8:0.2	$M_{0.16}(SO^{4}71HCO^{3}26)/(Ca56Na43)$	$M_{0.32}(SO^{4}90HCO^{3}8)/(Ca54Na45)$	0.2:0.8	
0.7:0.3	$M_{0.14}(SO^{4}65HCO^{3}31)/(Ca56Na43)$	$M_{0.30}(SO^{4}90HCO^{3}8)/(Ca55Na44)$	0.2:0.8	

Зависимость формы и продолжительности гидрогеохимического предвестника от соотношения параметров t_0 и τ_0

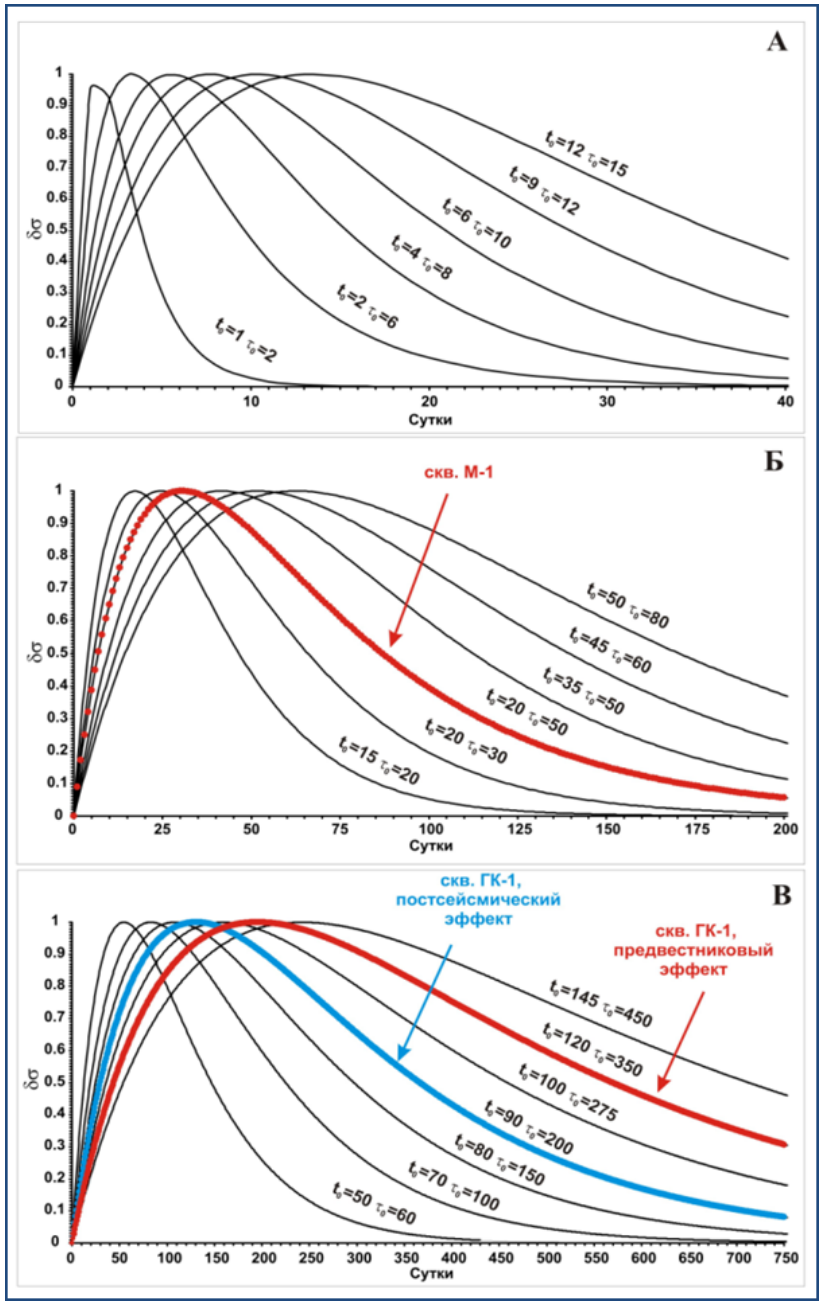
1. Соотношение параметров t_0 *и* τ_0 определяет форму и продолжительность аномалии.

2.Если параметры t_0 **и** τ_0 малы (Рис**. А**), то при редких наблюдениях (периодичность 3 суток и более), аномалия может не регистрироваться или представление о ее форме будет искажено (могут быть обнаружены единичные выбросы концентрации).

При периодичности наблюдений порядка 3 сут аномалии могут регистрироваться при величинах параметров t_0 и τ_0 не менее десятков – сотен суток (Рис. **Б и В**).

2. При практическом выделении аномалии важным является соотношение между амплитудой аномалии $\delta\sigma_0$ и относительной ошибкой аналитического определения химического компонента Δ. 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;
σ_2 - экстремальная концентрация на стадии аномалии, то определение такой аномалии является невозможным.

Развитие гидрогеохимического метода поиска предвестников связано с автоматизацией системы наблюдений на скважинах за интегральными показателями химического состава воды (электропроводимость, соленость, pH, Eh) совместно с наблюдениями за вариациями давления, разгрузки и температуры .



How Earthquakes Affect Groundwater

Guest Editors

Prof. Dr. Galina Kopylova
Dr. Svetlana Boldina

Deadline

30 November 2022

Special Issue

Invitation to submit

Water – an Open Access Journal by MDPI, IF 3.1

For decades, geosciences have been interested in studying the impact of earthquakes on groundwater. The variety of such effects on the groundwater level, discharge, temperature, and hydrogeochemistry has not yet been fully explained.

*This **Special Issue** focus on:*

a) systematic analysis of seismohydrogeological signals in groundwater changes on data of detailed observations and the creation of their models;

b) development of methods for assessing the quality of observational data in wells and other water vents for creating and testing models of earthquake effects in groundwater;

c) geophysical interpretation of the seismohydrogeological effects together with other seismological and nonseismological anomalies associated with the deformation of the earth's crust and seismic events;

d) statistical analysis of time series of hydrogeodynamic, gas-hydrogeochemical and isotopic parameters of groundwater to assess the spatio-temporal scales of seismohydrogeological effects against the impact of natural and technogenic processes;

e) assessment of the statistical significance hydrogeodynamic and hydrogeochemical earthquake precursors for earthquake prediction.

mdpi.com/journal/water
water@mdpi.com

Спасибо за внимание!