

УДК 523.2

Теория звёзд и планет в свете законов химии ядерной физики и термодинамики.

Д.Н. Тимофеев. тел/факс (39197) 5-16-38, E-mail htamp@inbox.ru

ООО фирма "Космическая Технология" г.Железногорск Красноярского края, Россия.

Используя законы и знания о свойствах веществ из области ядерной физики, химии, термодинамики представим модель небесных тел несколько отличную от принятой сейчас.

Ещё в 1909 году было высказано предположение, что значительное тепловыделение связано с существованием в Земле радиоактивных элементов [1,2,3]. Поскольку все планеты и Солнце образовались из одного газопылевого облака средний состав Земли должен соответствовать среднему составу метеоритов. Среднее содержание урана в метеоритах 0,39 грамма на тонну [4]. Так-как период полураспада урана $T_{1/2}=4,51 \times 10^9$ лет, а возраст Земли примерно 4,5 миллиарда лет, при образовании Земля имела 0,78 граммов урана на тонну. Из них половина 0,39 граммов распалась. Энергия урана 2×10^7 квт-ч/кг, Не трудно рассчитать, что количество энергии, выделившейся в одном килограмме минерала за 4,5 миллиарда лет составит 6700 ккал.

Минералы, учитывая их термодинамические свойства, превратятся в газ и разделяться на элементы при затрате энергии указанной в таб.1.

Таб.1

Минерал	Энтальпия Ккал/кг ΔH_{298}°	Теплоёмкость уд. Ккал/кг.гр C_p	t кипения °C	Скрытая теплота плавления Ккал/кг	Qпл Ккал	Скрытая теплота испарения Ккал/кг	Qисп Ккал	Энергия Ккал/кг ΣQ
SiO ₂	3418	O ₂ (53%) 0,2178	2600	395,1	185,7	2584,5	1215	5385
		Si (47%) 0,1683						
Al ₂ O ₃	3914,9	O ₂ (53%) 0,2178	1800	92,6	43,5	2407,4	1131	5716
		Al (47%) 0,248						
Fe ₃ O ₄	1153,3	O ₂ (30%) 0,2178	3200	65,2	45,6	1455,7	1019	2917
		Fe (70%) 0,153						

Причём, например, продукты разложения кремния будеу иметь ещё $6700-5385=1315$ Ккал/кг энергии. Это разогреет их (при средней теплоёмкости примерно 0,19 Ккал/кг·гр.) дополнительно ещё на 6921°C, что в сумме составит 9521°C. Кроме урана в Земле есть другие тепловыделяющие изотопы Th²³², K⁴⁰, которые ещё повысят температуру. Вероятно, часть урана из вещества планеты растворилась в расплавленном кремнии, истекла на поверхность, остыла и превратилась в литосферу, а часть расплавилась и погрузилась в земное ядро. В земной коре содержание урана примерно 3 грамма на тонну (по Виноградову). Земное ядро должно обогатится ураном ещё значительно, учитывая высокую плотность соединений урана. Но даже при содержании урана в 1 грамм на тонну температура поднялась до величины порядка 59000°C.

Возможна ли такая температура внутри Земли? Имеющийся тепловой поток из глубин обеспечивается градиентом в 20 градусов на километр глубины, что при экстраполяции давал бы температуру, например, в 30000°C уже на глубине порядка 1500км. При этом потери тепла из глубин Земли небольшие. При мощности излучаемого Землёй тепла $2,5 \times 10^{13}$ вт [5], за 4,5 миллиарда лет потери тепла составили бы $9,8550 \times 10^{26}$ вт·час или $8,465 \times 10^{26}$ ккал. При массе Земли 5976×10^{21} кг и удельной теплоёмкости принятой например как для магнетита, вся масса Земли могла бы остыть только на 824 градуса. В основном остыл наружный слой.

Допустим, что ядро разогрето на 30000°C. В каком же виде вещество ядер Земли? Часто в литературе можно встретить мнение о жидком состоянии ядра Земли. Но жидкое состояние на температурной шкале для веществ занимает очень узкую область. В Земле очень малый слой может находиться в жидком состоянии. Большое давление мало повышает

температуру кристаллического состояния веществ. Любое вещество при температуре выше критической (например для NaCl критическая температура 2402 °C) может находиться только в газообразном состоянии [6]. На классической диаграмме рис.1 мы видим, что например в точке "А" плотность вещества будет значительно меньше чем в холодном состоянии. Здесь уже не действуют законы для жидкостей, где объём может незначительно увеличиваться при повышении температуры. Здесь газ, и действует закон для газов.

$$PV=RT$$

Но плотность этих газов как у железа или свинца.

При температурах выше 10000 градусов все вещества могут находиться только в состоянии отдельных элементов, сильно ионизированны газобразны. Никаких сплавов, никаких химических соединений при этой температуре существовать не может, поскольку энергия химических связей значительно меньше кинетической энергии атомов.

Под действием гравитации все элементы неминуемо будут разделяться по слоям в порядке увеличения плотности к центру планеты(рис.2). При оценке относительной плотности, в связи с высоким давлением(воспользоваться законом Авогадро в данном случае не удастся) необходимо учесть размеры ионов. Целесообразно ввести понятие "Относительная удельная плотность иона", которую предлагаю рассчитать по формуле:

$$\rho = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi r^3}$$

ρ -относительная удельная плотность иона (атомный вес/ангстрем³);
 r -ионный радиус элемента в ангстремах;
 A -атомный вес элемента в углеродных единицах.

Такая оценка позволяет понять как соотносятся плотности ионизированных газов отдельных элементов между собой при одинаковой температуре таб.2.. Это соотношение плотностей сильно отличается от соотношения плотностей элементов в нормальных условиях, когда проявляется влияние внешних электронных оболочек. При повышении температуры плотность ионизированного газообразного вещества уменьшается в соответствии с универсальным газовым законом.

Табл.2

H	0,00	Sr	12,11	Al	34,79	Gd	45,22	Rh	68,68	Os	107,70	Te	173,60
He	0,51	Ba	12,48	Jn	35,21	Nd	47,27	Ga	69,87	Pu	108,70	Ge	203,56
Ne	1,18	Mg	14,33	Pm	37,30	Dy	51,50	Lu	70,51	Ir	108,80	At	210,40
Ar	1,35	Ag	17,85	Ni	37,57	Be	54,77	Pa	75,68	Pb	112,70	J	242,50
Kr	2,58	Ra	18,08	Co	37,71	Th	54,90	Au	76,62	Si	113,11	Re	253,20
Xe	3,03	Sc	18,78	Sm	39,34	Ho	55,89	Nb	77,19	Am	113,40	B	279,06
K	3,97	Y	23,27	Zr	39,52	V	59,25	Hf	77,32	Sb	122,00	S	283,67
Li	5,27	Zn	27,31	Ac	39,64	Er	60,67	Mo	83,45	Bi	123,20	Br	321,76
Na	5,83	Cd	27,67	Eu	41,03	Tu	63,44	Cr	88,35	Tc	131,90	C	361,56
Rb	6,17	La	29,50	Ce	41,61	Tb	64,04	Sn	94,21	Mn	134,81	Se	439,88
Cs	7,07	Cu	29,64	Tl	42,17	Pd	65,32	U	99,42	Ta	150,30	Cl	481,85
Ca	8,51	Hg	34,11	Pr	43,22	Yb	67,30	Np	102,70	W	159,90	N	991,36
Fr	9,94	Fe	34,29	Ti	43,64	Ru	67,47	Pt	106,10	As	172,34	O	5242,33
									P	172,56	F	13230,97	

Из таблицы видно, что вопреки ожиданиям, актиноиды имеют не самую большую плотность, а торий находится почти в середине таблицы. Это объясняется сравнительно большим объемом ионов актиноидов. Надо отметить, что такие плотности имеют ионы при

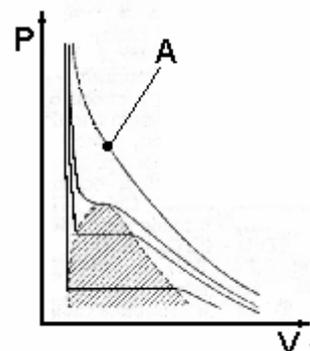


Рис.1

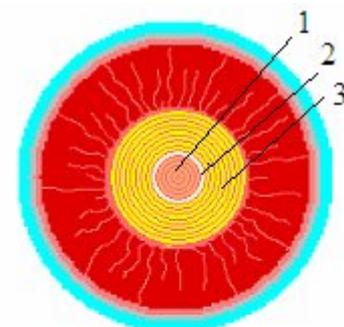


Рис.2 Строение земли

- 1 Внутреннее ядро
- 2 Переходная зона
- 3 Наружное ядро

максимальной степени ионизации наружного электронного слоя. Ионы, которые способны проявлять несколько положительных валентностей, могут иметь несколько состояний ионизации, иметь несколько вариантов размеров, несколько состояний плотности и создавать несколько слоёв на разных уровнях ядра Земли. Учитывая, что радиус ядра Земли равен примерно 3,5 тысячи километров, а количество элементов ядра примерно 75 (более лёгкие элементы всплывут в астеносферу), то толщина слоя (слоёв) каждого элемента в среднем будет равна примерно 46 километрам.

Так называемая переходная зона между наружным и внутренним ядрами, это слой от тория до плутония.

В результате процессов радиоактивного распада температура в слоях тория, урана, плутония, должна быть выше, чем слоёв нерадиоактивных элементов. Кроме того слой урана под действием гравитации разделяется на слои изотопов, отличающиеся по плотности. На отдельных участках отсепарированный U^{235} при достижении критической массы, вызывает тепловые всплески в результате реакций цепного ядерного деления. Аналогичные всплески происходят в слое Pu и в слое U^{233} . Локальные температурные всплески в переходной зоне вызывают турбулентности во внешнем ядре. Горячая реакционная масса, передаёт тепло более лёгким веществам. Не среагировавший U^{235} , U^{233} и Pu сепарируются в свои слои, а продукты распада распределяются по слоям с соответствующим удельным весом. Опускаются тяжёлые фракции вещества мантии, которая плавиться от выделившегося тепла. Эти турбулентности создают магнитное поле планеты [7]. Поскольку температурные всплески происходят то в одном месте, то в другом, происходит блуждание полюсов магнитного поля.

Ядерное топливо Земли состоит по большей части из U^{238} , а также Th^{232} которые сами не могут распадаться по цепному механизму. Однако распад возможен под действием нейтронов выделяющихся при взрывах U^{233} , U^{235} , Pu. Под действием нейтронов также происходит превращение Th^{232} в U^{233} , а U^{238} в Pu. Реакции широко известны и используются в промышленном масштабе в реакторах размножителях.

Ионы, имеющие плотность больше чем у ионов плутония, составляют внутреннее ядро Земли. В этих слоях нет ни химических ни ядерных реакций, нет движения.

Мантия земли единственный слой, который в большой степени сохранился с времён образования планеты. Мантия состоит в основном из твёрдого вещества, преобразуется путём зонной плавки изнутри, растворяется в наружном ядре, расходуется на увеличение наружного и внутреннего ядер, и пополняет переходную зону ядерным топливом. Наиболее лёгкие фракции вещества мантии попадают в астеносферу. В ряде мест мантии лёгкими легкоплавкими фракциями вещества внешнего ядра (лавой) промыты каналы и заполнены трещины местами до земной коры. Возможно, что места трещин и промоин в мантии соответствуют линиям разломов в земной коре. На поверхности мантии кристаллизовались из внешнего ядра наиболее тугоплавкие вещества и соединения Al_2O_3 , BN, B_4C , C, BeO, CaO, CrO_3 , TiC, ZrN, ZrO_2 .

Мантия и астеносфера это область химических реакций. На каждом уровне по глубине, в условиях перемены давления температуры и среды происходят химические преобразования веществ. Вещества, поднимаясь (или опускаясь в зависимости от плотности) в лаве, переходят в наиболее стабильное состояние для имеющихся в данном месте условий.

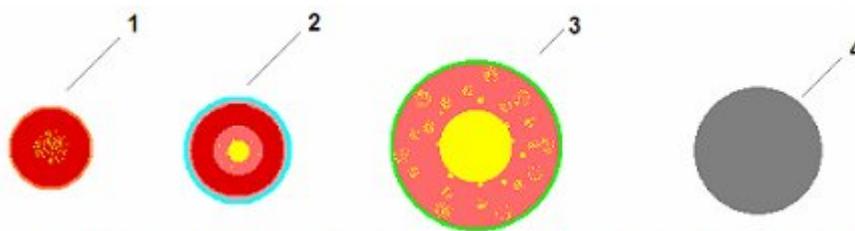


Рис.3 Трансформация планеты. 1. Планета после зарождения до начала цепной реакции. 2. Нынешнее состояние Земли. 3. Планета после израсходования мантии. 4. Земля после охлаждения.

Зная состояние Земли в настоящее время можно предположить, в каком состоянии находилась Земля в момент зарождения, какие протекали процессы, и что ждёт Землю в будущем.

Логично предположить, что в момент образования, Земля собралась в сравнительно однородную массу рис.3. Далее в течение примерно 4 миллиардов лет происходил медленный разогрев планеты. 200 миллионов лет назад произошла сепарация элементов ядра, концентрация в слоях ядерного топлива, и начало цепных реакций. Это привело к резкому увеличению мощности тепловыделения в ядре Земли. Из-за разогрева происходит увеличение размера Земли. 200 миллионов лет назад (именно такой возраст самых древних пород мирового океана [5]) поверхность Земли состояла только из нынешних материков покрытых одним океаном (включая шельф). Её площадь была 71% от нынешней поверхности планеты. Из-за разогрева и вздутия ядра, земная кора покрылась трещинами, края которых стали расходиться. Так образовалось ложе океанов. Вода постепенно ушла в это ложе с поверхности, и появились материки. Этим объясняется то, что на дне океанов нет гранитного щита, и нет осадочного слоя, которые образовались до начала расползания материков. Поверхность Земли возросла в на 40% (собственно ложе океанов), диаметр увеличился в 1,18 раза, а объём возрос в 1,65 раза. Если средняя плотность вещества Земли сейчас 5517 кг/м^3 то до начала расширения средняя плотность вещества Земли составляла 9089 кг/м^3

Можно спрогнозировать, путь дальнейшего преобразования Земли. Расширение Земли продолжится. Произойдёт дальнейший разогрев ядра. Мантия и Земная кора расплавятся. Земля будет состоять только из внутреннего и наружного ядер. Поверхность может разогреться на несколько сотен градусов, соответствующих температуре, при которой количество сбрасываемого тепла Землёй будет равно количеству выделяемого тепла при ядерных реакциях. Земля увеличится в диаметре ещё в 2-4 раза, океаны испаряться, атмосфера наполнится водяными парами, сероводородом, сернистым ангидридом, и углекислым газом. Местами могут появиться моря лавы.

В настоящее время такое состояние имеет Юпитер. Благодаря значительной гравитации скорость сепарации там выше, ядерные реакции и разогрев идут интенсивней. Мантия и кора Юпитера расплавилась, объём планеты увеличился. В результате твёрдая поверхность Юпитера очень тонкая и местами состоит из отдельных участков плавающих на лаве.

На фотографии красное пятно Юпитера рис.4. Это не что иное, как море лавы. Его можно наблюдать благодаря глазу урагана, находящемуся над этим морем. Аналогичные ураганы наблюдаются и на Земле рис.5

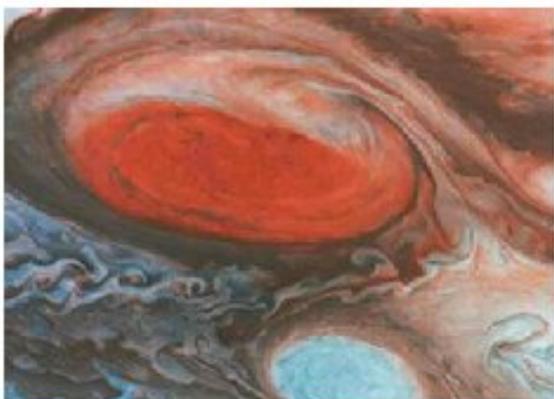


Рис.4 Юпитер. Красное пятно NASA



Рис.5 Ураган Изабелла, 2003 год
Фото сделано с МКС

В дальнейшем, После того как израсходуется ядерное топливо, Земля остынет и сожмётся, до величины немного большей, чем при зарождении, а скорость вращения возрастёт.

В настоящее время из-за разогрева ядра, и увеличения количество в ядре ядерного топлива, начинают усиливаться вулканические процессы, увеличиваться количество и мощность землетрясений, возрастут возмущения магнитного поля Земли.

Принятая многими учёными теория строения водородного Солнца не соответствует представлениям космогонии в том, что Солнце и планеты образовались из одного газопылевого облака. При таком образовании состав небесных тел не отличался бы. Кроме того, термоядерный синтез происходит мгновенно, а Солнце горит долго [8,9].

Как и на Земле, на Солнце идут процессы ядерного распада. Из-за большой гравитации, и следовательно, большой скорости сепарации, ядерные процессы на Солнце идут интенсивней, чем на Земле. Ни мантии, ни коры на Солнце нет. Всё ядерное топливо на поверхности внутреннего ядра.

Одновременно происходит большое количество взрывов в слоях U^{235} , U^{233} , Ph. Весь уран одновременно взорваться не может, поскольку U^{238} из которого состоит основная масса слоя, не распадается по цепному механизму, процесс сепарации U^{235} продолжителен, а накопиться U^{235} в большом количестве не может, поскольку при достижении критической массы происходит взрыв. Под действием нейтронов происходит превращение Th^{232} в U^{233} , а U^{238} в Pu. Этим пополняется запас ядерного топлива способного к цепной реакции деления. Таким образом, происходит процесс саморегулирования интенсивности горения Солнца. Существует равновесие между процессом сепарации элементов и ядерными взрывами. Длительная сепарация ядерного топлива, на каком либо участке слоя неизбежно приводит к появлению сверхкритической массы и взрыву.

Саморегулирование имеет и второй механизм. В случае перегрева уранового слоя плотность урана уменьшается, он смешивается с находящимися выше элементами, что временно нарушает процесс сепарации U^{235} . Возможно, по этой причине на Солнце в отдельных местах возникают пятна.

Мощные ядерные взрывы на внутреннем ядре образуют раскалённые зоны, которые, поднимаясь к поверхности, растекаясь в фотосфере, образуют светящиеся гранулы. Совокупность светящихся гранул обеспечивает свечение Солнца. Выделяющийся в процессе ядерных реакций гелий, время от времени вырывается наружу, создавая протуберанцы.

Объём Солнца состоит из слоёв плазмы элементов, чередующихся в порядке возрастания плотности таб.2 рис.6. При этом, учитывая, что стабильных элементов в природе 98, а радиус солнца 696000 километров, то толщина слоя (слоёв) каждого элемента в среднем составит 7100 километров. Видимая поверхность Солнца состоит из калия, иона металла имеющего наименьшую относительную плотность и излучающего свет, в отличие от водорода и гелия, излучение которых незначительно. В центре Солнца находится ионизированный фтор.

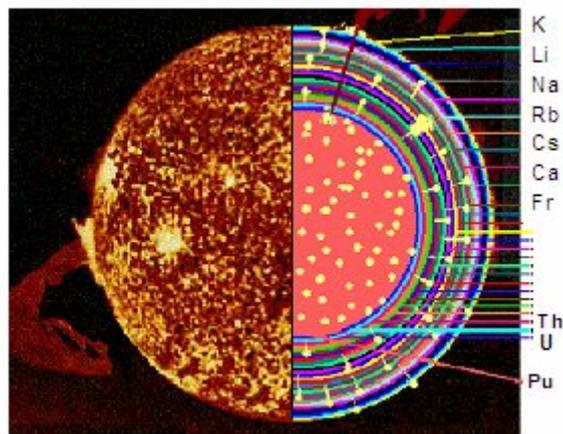


Рис.6 Структура Солнца

Рис.6 Структура Солнца

ЛИТЕРАТУРА

1. Vaslow F., Newton A. S., Report CK-1498, June 17, 1944, p.10 (MP Ames 2);
2. Gates J. W., Clewett G.H., Andrews L.J., Pitt R.B., Report CD-457, Aug. 4, 1944 (GEW-TCE 2);
3. Report [B]LRG-22, July 1943 (British 4);
4. Краткая химическая энциклопедия Т3 стр.175., М., 1964;
5. Большая Советская энциклопедия т.9 стр.481., М., 1972;
6. Краткая химическая энциклопедия Т2 стр.856., М., 1963;
7. Велихов Е.П. Изменения магнитного поля земли: возможные причины и следствия.// Экология и жизнь 4 (65) 2007;
8. Тимофеев Д.Н., Что есть наше светило. Город и горожане. №93, 2003;
9. Тимофеев Д.Н., Заглянем в солнце. Красноярский рабочий. №19, 2004.

УДК 550.8

Пространственно-временная изменчивость сигналов геоакустической и электромагнитной эмиссии в скважинах

А.К. Троянов¹, (343) 267 88 91, ф. (343) 267 88 72,

Ю.Г. Астраханцев¹, (343) 267 95 68

Н.И. Начапкин¹, (343) 267 95 59, Nachapkin@mail.ru

А.К. Таланкин², Е.А. Баженова²

¹ Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский горно-геологический университет, Екатеринбург, Россия

Изучение вариаций геоакустической эмиссии (ГАЭ) привело к открытию явления модуляции ГАЭ длиннопериодными деформационными процессами. При этом появилась возможность по известным периодичностям деформационных процессов выделять в вариациях ГАЭ аналогичные периоды и таким образом объяснять их природу. Экспериментальными исследованиями в скважинах было установлено, что в вариациях амплитудного уровня ГАЭ уверенно выделяются суточные и полусуточные периоды. Изучение акустического отклика геосреды на воздействие приливных деформационных процессов позволяет оценить физико-механические свойства горных пород в условиях больших литостатических давлений и их изменения во времени. Аномалии ГАЭ можно рассматривать как индикаторы современных динамических процессов, противостоящих консолидации верхней части земной коры. Различие в амплитудном уровне ГАЭ по стволу скважины служит диагностическим признаком, позволяющим дифференцировать геологический разрез по новому геофизическому параметру – *динамической активности среды*. Это позволяет классифицировать геологические разрезы на динамически пассивные и активные. Максимальные амплитуды ГАЭ, как правило, пространственно совпадают с зонами разломов, дробления и трещиноватости пород по разрезам скважин. Наличие таких аномалий ГАЭ является отражением динамической расслоенности тектонически нарушенной геологической среды. Динамически пассивные геологические разрезы могут быть представлены одним типом пород или же переслаиванием пород различного состава. Для таких разрезов характерен низкий амплитудный уровень ГАЭ и, соответственно, слабая динамическая расслоенность.

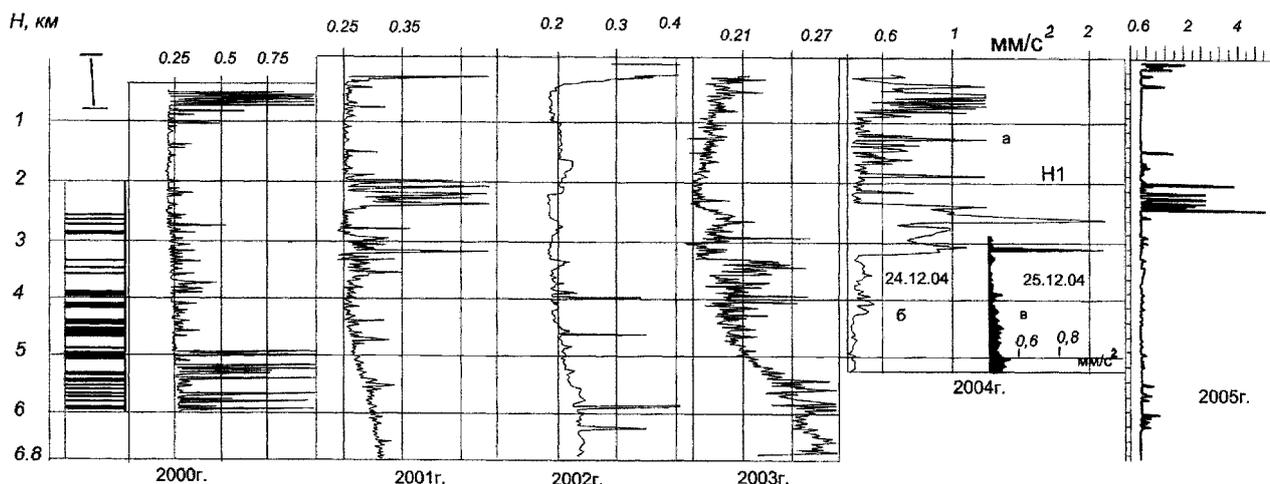


Рис. 1. Пространственно-временная изменчивость амплитудного уровня геоакустической эмиссии в Кольской СГ-3. I – тектоническая колонка (интервалы нарушенных пород выделены черным цветом). В 2004 г.: а - измерения с шагом записи через 10 м, ниже – через 40 м.; б, в – первичная и повторная запись ГАЭ, соответственно, с шагом 20 м.

Исследования геоакустических шумов диапазона частот 0.1 - 5.0 кГц, проведенные в Кольской сверхглубокой скважине СГ-3 в период с 2000 по 2005 гг. (рис. 1), дают основания для следующих выводов: 1) Выявленная по скважинным наблюдениям ГАЭ динамическая расслоенность геологической среды дает новые представления о современной динамике верхней части земной коры. Исследованный интервал скважины с 300 до 6840 м является динамически активным, при этом наблюдаются как временные изменения геодинамического состояния среды, так и пространственные (по глубине). 2) Аномалиями геоакустических шумов выделяются зоны дробления, трещиноватости пород и каверн. Это свидетельствует о развитии современных динамических процессов в указанных зонах. 3) Обнаружены процессы газовыделения из некоторых интервалов разреза скважины. При этом отмечаются ежегодные изменения границ интервалов газовыделения и в тоже время, стабильность положения по глубине отдельных его участков

При деформации или разрушении многих твердых тел возникают электрические заряды, генерируется электромагнитное излучение (ЭМИ), наблюдается эмиссия электронов, световые и другие эффекты. В последующем ЭМИ регистрировали на образцах минералов и горных пород при механических, тепловых и других воздействиях. Значительный объем исследований ЭМИ был выполнен с целью прогнозирования ударов, землетрясений и других геодинамических явлений. Принципиальным продвижением в выяснении природы ЭМИ было обнаружение корреляционных связей ЭМИ с геоакустической эмиссией пород в естественном залегании на различных глубинах. Действительно, исследования фоновых акустических и электромагнитных полей по разрезам глубоких скважин показали, что максимальные уровни сигналов как одной, так и другой природы большей частью приурочены к интервалам, характеризующихся повышенной трещиноватостью, нарушенностью пород. Конечно, это только общая закономерность, выражающая преимущественную тенденцию в распределении ЭМИ и ГАЭ по скважинам. Иногда наблюдаются отступления от видимой корреляции сигналов по акустическому и электрическому каналам. В этом отражается, по-видимому, не только разная природа фиксируемых полей, но и своеобразие свойств, структуры пород, влияющих на амплитудно-частотные характеристики механоакустических и механоэлектрических преобразователей.

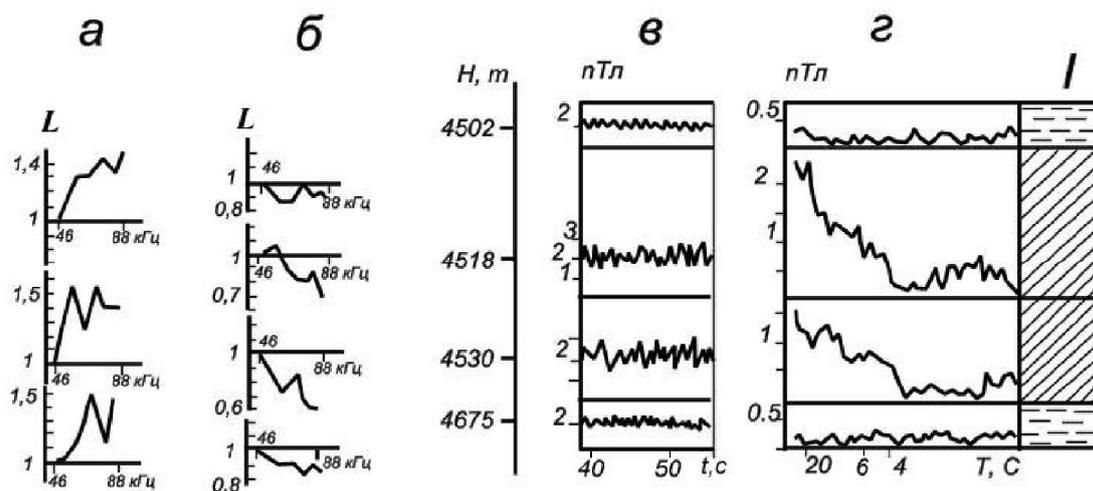


Рис. 2. Относительное распределение амплитуд огибающей сигналов ЭМИ: а, б – графики параметра L в мелкозернистых и крупнозернистых породах, соответственно, и выявление трещиноватых пород по спектрам ЭМИ: в – фрагменты записи огибающей сигналов ЭМИ, г – их спектры. I- колонка трещиноватости пород.

Цель исследований электромагнитного излучения во внутренних точках земной коры заключалась в изучении возможностей ЭМИ как индикатора современных деформационных

процессов в недрах земной коры. На рис. 2 приведены результаты измерений ЭМИ по скважине в мелкозернистых и крупнозернистых породах. Введен параметр L , характеризующий отношение сигналов любой из текущих частот из дипазона 46-88 кГц к сигналам на наименьшей частоте (в данном случае 46 кГц). В мелкозернистых породах с относительно малыми размерами трещин (рис. 2а) отношение амплитуд сигналов L увеличивается с увеличением частоты, а в крупнозернистой среде с относительно большой величиной трещин (рис. 2) отношение амплитуд уменьшается с увеличением частоты регистрируемых сигналов.

Если геологическая среда обладает способностью реагировать на периодичность воздействия деформационных процессов соответствующим изменением ЭМИ, то она является наиболее ослабленной, нарушенной, а, следовательно, и подвижной. В этом плане воздействие штормовых микросейсм первого и второго рода с периодичностью, соответственно, 4-10 сек и 10-20 сек должно проявляться в вариациях огибающей сигналов ЭМИ в интервалах глубины скважины, в которых имеются условия для развития процессов трещинообразования.

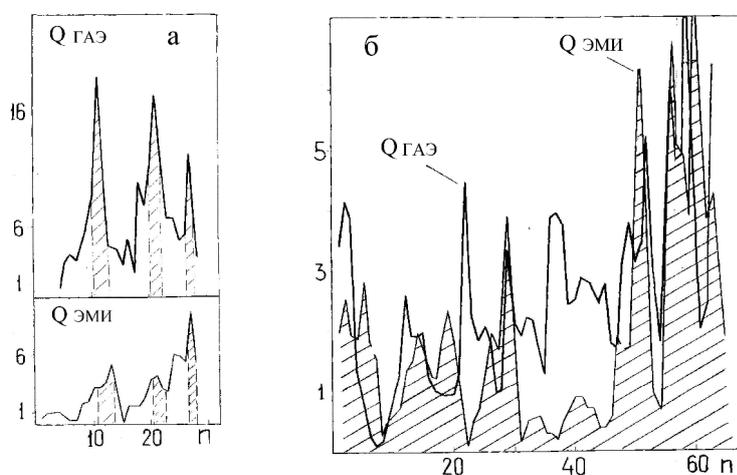


Рис. 3. Изменение коэффициентов Q при комплексных измерениях сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в скважинах: а – глубина 603 м, Ломоносовское железорудное месторождение, Тургайский прогиб, Северный Казахстан; б – глубина 81 м, Чусовское месторождение, Серовско-Маукский глубинный разлом, Средний Урал. n -количество сдвигов интервала (128 ч) на 8 часов.

Наблюдения ЭМИ в Уральской сверхглубокой скважине СГ-4 в течение 3-5 минут осуществлялись при остановке прибора на заданной глубине в открытом стволе скважины. Чувствительность приемного тракта аппаратуры составляла 10^{-12} Тл, при этом амплитудный уровень регистрируемых на частоте 110 кГц сигналов ЭМИ изменялся в пределах $1,5 \div 5 \cdot 10^{-12}$ Тл. После проведения измерений осуществлялся гармонический анализ каждой записи, а затем по наличию или отсутствию в спектрах огибающих сигналов ЭМИ доминирующих периодов диапазона 4-20 сек и более, делалось заключение о наличии или отсутствии динамически активных трещиноватых пород. На рис.2в приведены фрагменты временных вариаций огибающей сигналов ЭМИ на частоте 110 кГц с указанием их амплитудных значений в пТл. Спектры записей длительностью 3 минуты на глубинах 4502, 4518, 4530 и 4675 м представлены на рис.2г. В колонке косой штриховкой показаны интенсивно трещиноватые породы, а горизонтальной пунктирной линией – плотные породы.

Предположим, что существует тесная связь между изменениями сигналов ЭМИ и ГАЭ. Введем коэффициент Q , характеризующий отношение амплитуд суточной периодичности и полусуточной в каждом спектре временного интервала длительностью 128 часов для каждого из рассматриваемых процессов, то есть ЭМИ и ГАЭ. Если существует тесная связь,

то изменение коэффициентов Q во времени должны происходить одинаково с соблюдением некоторой пропорции. Результаты сопоставления коэффициентов Q при совместных измерениях ГАЭ и ЭМИ в скв. 470 на Ломоносовском железорудном месторождении (Тургайский прогиб, Кустанайская обл., Северный Казахстан) приведены на рис. 3а. Эта скважина находится на удалении примерно 200 м от борта тектонического разлома в консолидированном массиве пород. Связь двух процессов – ГАЭ и ЭМИ – здесь очевидна.

В пределах Серовско-Маукского глубинного разлома (Средний Урал) временные изменения параметра Q двух рассматриваемых процессов представлены на рис.3б. Здесь непропорциональность изменения коэффициентов Q на отдельных временных интервалах указывает на факторы, осложняющие эту связь. К этим факторам можно отнести особенности геологического строения (в данном случае глубинный тектонический разлом), состава и свойств геосреды, включая влияние тектонических сил.

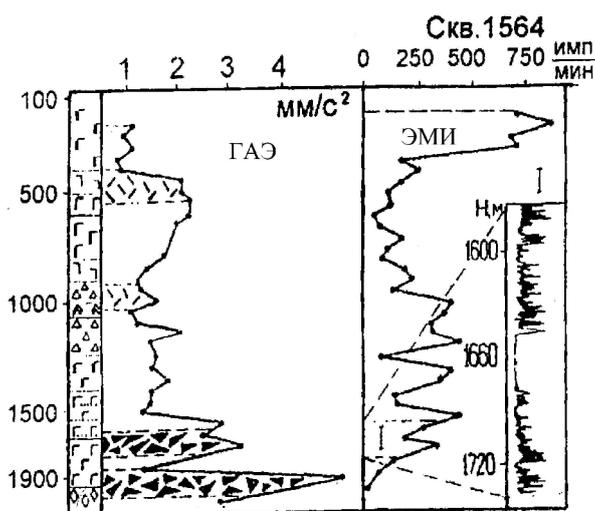


Рис. 4. Комплексные измерения геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения по стволу скв. 1564, Качарское железорудное месторождение, Тургайский прогиб, Северный Казахстан.

I – непрерывная запись ЭМИ при движении прибора. На глубинах 500 и 1000 м отмечены зоны трещиноватых пород, 1700-1900 м – зоны дробления.

На рис. 4 приведены результаты комплексных измерений ГАЭ и ЭМИ в скв. 1564. Максимумы интегрального уровня сейсмоакустических сигналов выделяются две нарушенные зоны в интервалах глубин 1600-1700 м и 1800-1900 м. На кривой счета выбросов огибающей сигналов ЭМИ эти зоны максимумами не выделяются. Наоборот, здесь наблюдается снижение интенсивности ЭМИ вплоть до фоновых значений. Результаты, полученные при непрерывной записи интенсивности ЭМИ со скоростью подъема скважинного прибора 250-300 м/час (интервал показан штриховкой) в верхней зоне нарушенности, хорошо согласуются с данными точечных измерений.

По изучению керна установлено, что это две зоны дробления с развитой трещиноватостью в кровле и подошве. Таким образом, для аномалий ГАЭ, характеризующих динамически активные зоны дробления, уменьшение интенсивности ЭМИ является той дополнительной информацией, которая снижает проблему неоднозначности в интерпретации получаемых данных. Для динамически активных трещиноватых пород согласованное изменение сигналов ЭМИ и ГАЭ также является дополнительной информацией, подтверждающей тектоническую природу аномалий ГАЭ.

Анализ временных вариаций амплитудного уровня огибающей сигналов ЭМИ позволил выделить доминирующие периодичности на записях продолжительностью около 7 мин. Как видно на диаграммах СВАН (рис.5 а, б) выделяются амплитудные аномалии сигналов ЭМИ с периодами 4, 13, 25 сек. На двух других глубинах (рис 5 в, г) эти

периодичности либо отсутствуют, либо проявляются слабо, что свидетельствует об их низкой интенсивности. Наличие доминирующих периодичностей (на диаграммах 5 а, б залиты черным цветом) указывает на воздействие внешних деформационных процессов на тектонически ослабленную зону с периодами тождественными штормовым микросейсам. СВАН-анализ позволяет также определить начало воздействия и его продолжительность.

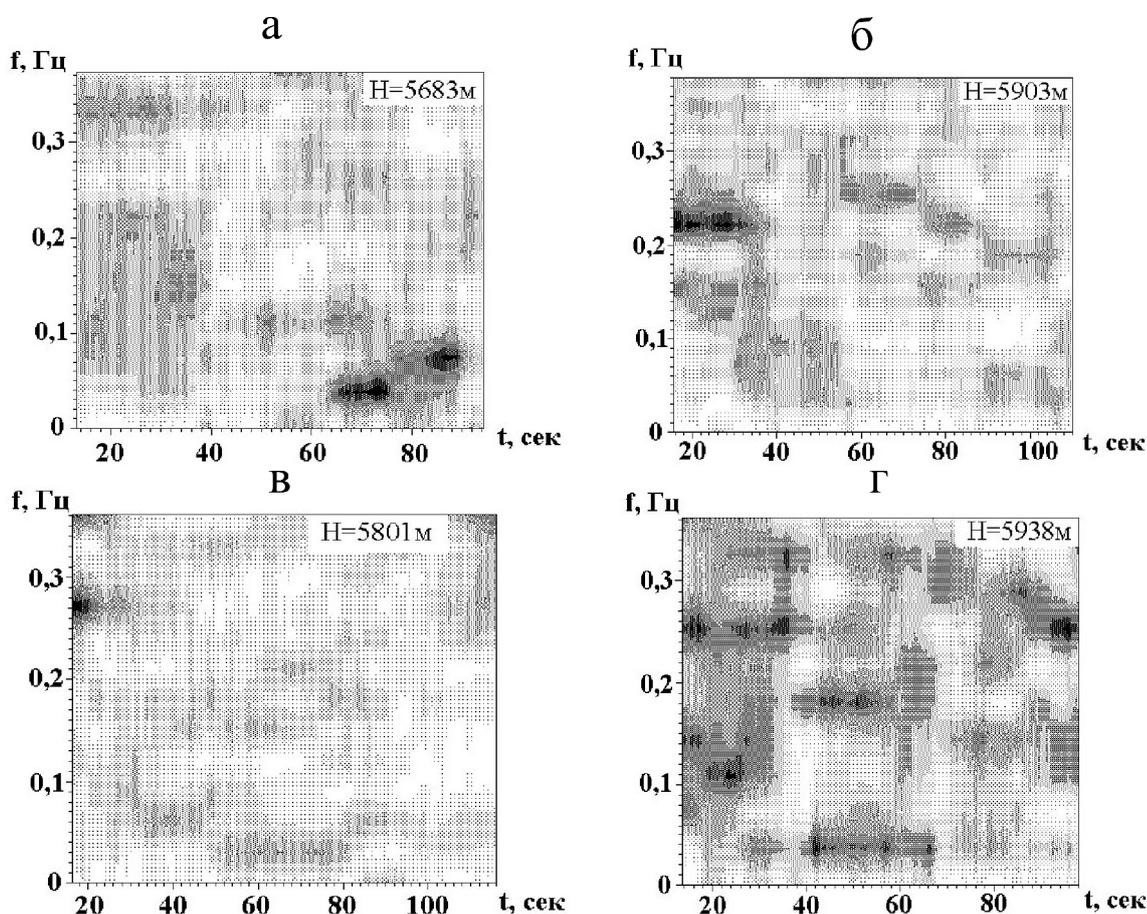


Рис.5. СВАН диаграммы сигналов ЭМИ измеренных в Уральской сверхглубокой скважине (сентябрь 2004 г.).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 08-05-01084.

УДК 550.8

О сейсмоакустическом и электромагнитном излучении геосреды по наблюдениям в скважинах

А.К. Троянов¹, (343) 267 88 91, ф. (343) 267 88 72,

Ю.Г. Астраханцев¹, (343) 267 95 68

Н.И. Начапкин¹, (343) 267 95 59, Nachapkin@mail.ru

Е.А. Баженова²

¹ *Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

² *Уральский горно-геологический университет, Екатеринбург, Россия*

Изучение сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и электромагнитного излучения (ЭМИ) горных пород в сверхглубоких скважинах позволяет выявить геомеханические

процессы, характеризующие современные движения земной коры. Во временных вариациях амплитудного уровня САЭ и ЭМИ могут наблюдаться периодичности таких известных деформационных процессов, как штормовые микросейсмы, собственные колебания Земли, лунно-солнечные приливы и др. Учитывая нелинейный отклик геологической среды на воздействие деформационных процессов, а также влияние условий наблюдений, из накопленного опыта исследований, можно утверждать, что регистрация САЭ и ЭМИ горных пород на больших глубинах открывает новые возможности в изучении связи между деформационными процессами, акустической и электромагнитной реакцией среды, а также при исследовании современной динамики земной коры.

Разработанная в Институте геофизики УрО РАН комплексная цифровая аппаратура обладает чувствительностью, позволяющей регистрировать акустический и электромагнитный отклик геосреды на деформации порядка $10^{-8} - 10^{-11}$ м. Регистрация САЭ и ЭМИ (полоса частот 45-110 кГц, диапазон измерений 0,1-10 пТл) осуществляется тремя ортогонально расположенными датчиками-акселерометрами типа ДНЗ (преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный) и ферромагнитными датчиками регистрации ЭМИ. В скважинном приборе устанавливаются датчики регистрации механических вибраций с коэффициентами преобразования по напряжению не менее $6-10 \text{ мкВс}^2/\text{мм}$. Амплитудный уровень САЭ в разных полосах частот представляется в единицах регистрируемого ускорения $\text{мм}/\text{с}^2$, ЭМИ в пТл. Запись акустических сигналов с трех направлений стала возможной благодаря слабой поперечной чувствительности датчиков (относительный коэффициент поперечного преобразования не более 4 – 10 %). Поперечная чувствительность датчика-акселерометра определяется его максимальной чувствительностью к колебаниям в направлении, перпендикулярном его главной оси, то есть параллельном поверхности, на которой он установлен. Таким образом, в скважине на заданной глубине фиксируются сигналы с трех направлений, что дает возможность для их сравнения по амплитуде в разных полосах частот. В ЭМИ также происходит разделение сигналов по трем компонентам.

Распределение амплитудного уровня САЭ и ЭМИ с глубиной происходит поразному и может испытывать локальные изменения во времени. Амплитудные уровни САЭ и ЭМИ зависят от геологических и тектонических особенностей исследуемой среды. Максимальные уровни сигналов наблюдаются на участках современных активных микродвижений земной коры и пространственно совпадают с зонами разломов, интервалами дробления и трещиноватости горных пород по разрезу скважин [1,2].

Из многих экспериментальных работ на образцах горных пород известно, что с возрастанием всестороннего давления число трещин уменьшается и повышается прочность пород. В реальных условиях верхней части земной коры наблюдаются существенные отклонения от этих закономерностей. Они обусловлены рядом причин, в том числе непрерывными физико-химическими процессами в проницаемых, заполненных флюидами и газами горных массивах. Прочность хрупких пород хорошо аппроксимируется модифицированным условием Кулона-Мора:

$$\sigma_p = \tau_c - f(\sigma_n - P),$$

где τ_c – сцепление пород, f – коэффициент трения при сдвиге, σ_n и P – соответственно нормальное напряжение и давление в жидкости, заполняющей трещину.

Когда f мало, а σ_n и P близки, что выполняется в замкнутых объемах, то и на больших глубинах прочность на сдвиг будет в основном определяться сцеплением пород. Как показывают лабораторные эксперименты, оно растет с давлением, так как уменьшаются размеры дефектов и увеличиваются упругие модули. Но при этом следует заметить, что напряжение на разрыв будет расти только в том случае, когда поверхностная энергия не будет эквивалентно уменьшаться. Фактически же, с глубиной, флюиды понижают свободную поверхностную энергию трещин. Кроме того, прочность связей может уменьшаться за счет эффекта Ребиндера, что учитывается, например, в модифицированной формуле Гриффитса:

$$\sigma_n = \left[\frac{2Gw}{(1-\mu^2)\pi l} - \frac{\sigma_p}{2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где w – плотность поверхностной энергии, l – критическая длина трещины, μ – коэффициент Пуассона, σ_p – напряжение растяжения Ребиндера в вершине трещины. В понижение прочности пород вносят также свой вклад коррозия под напряжением, электрохимические процессы и, наконец, рост температуры с глубиной. Энергия активации разрывов в горных породах растет с повышением давления и уменьшается с увеличением температуры. В результате действия этих двух конкурирующих факторов и физико-механических процессов на некоторых глубинах, в зависимости от состава и свойств пород, энергия активации разрывов может достигать минимума, и за счет термофлуктуационного механизма, сдвиговых квазистационарных напряжений и сравнительно небольших переменных может увеличиваться вероятность возникновения разрывных дефектов. Тем самым, на больших глубинах могут создаваться условия для сохранения проницаемости разломов и образования трещиноватых горизонтов пород, которые будут выделяться аномально высоким амплитудным уровнем САЭ и ЭМИ. Прежде всего, САЭ и ЭМИ связаны с динамикой разрывов, образованием новых поверхностей раздела в среде, что приводит к возбуждению упругих колебаний, возникновению, перемещению и релаксации электрических зарядов.

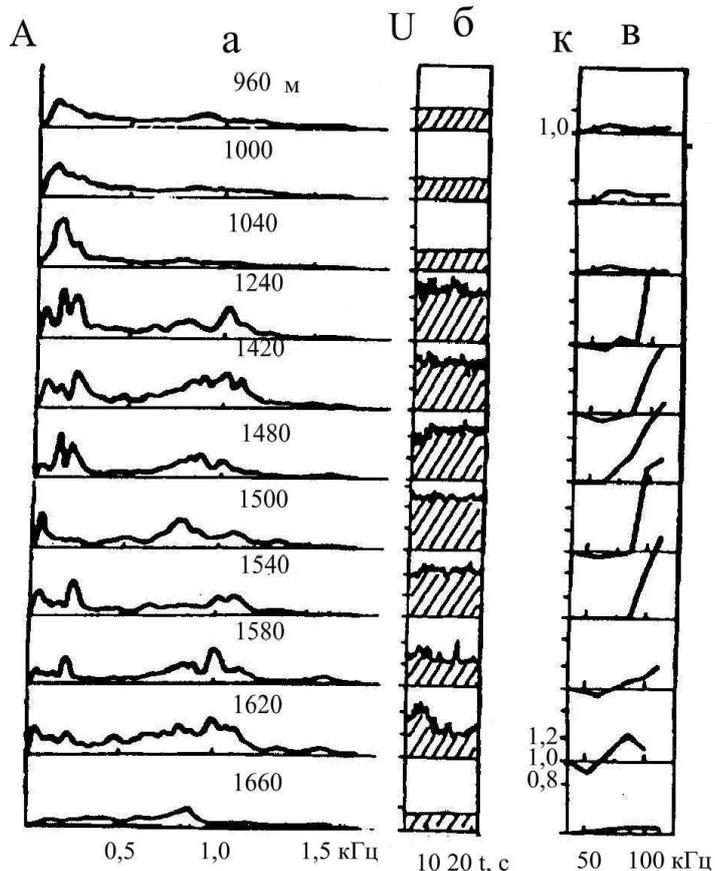


Рис.1 Распределение САЭ и ЭМИ по скважине 1573 (Качарское железорудное месторождение, Северный Казахстан): а – осредненные амплитудно-частотные спектры САЭ; б – фрагменты огибающей сигналов ЭМИ на частоте 100 кГц; в – частотное распределение интенсивности ЭМИ относительно уровня ЭМИ на частоте 51 кГц.

Следует обратить внимание на то, что зоны повышенной трещиноватости, с одной стороны, являются ослабленными в структуре горного массива, а с другой, именно в них реализуются максимальные напряжения. По существу, эти зоны выполняют функции усилителей как сжимающих, так и сдвиговых напряжений через механизм контактных площадок (связей) со

средним коэффициентом концентрации напряжений $K=S/S_1$, где S – площадь поверхности сплошного контактирования блоков, разделенных трещиноватой зоной, S_1 – площадь сечения контактов. Фрактальность поверхностей приводит к неравномерному распределению напряжений и деформаций на контактах, а следовательно, к значительным вариациям K . В результате контактные связи между блоками различного масштабного уровня под действием гравитационных, тектонических и других сил имеют некоторое распределение по стартовым разрывным напряжениям. Тем самым, создаются условия для триггерного механизма инициирования САЭ и ЭМИ с земными приливами и другими импульсными или периодическими воздействиями, хотя создаваемые ими деформации в земной коре далеки от разрушающих и не превосходят несколько единиц на 10^{-8} . Следует

отметить, что в осадочных комплексах пород интенсивность САЭ и ЭМИ примерно в три раза ниже, чем в кристаллических. Если обратиться к спектрам электромагнитных сигналов в скважине, то можно отметить, что более высокочастотные спектры преимущественно соответствуют мелкозернистым породам, а низкочастотные – крупнозернистым [1]. Это согласуется и с результатами лабораторных экспериментов на образцах [3], где показано, что спектры электромагнитных импульсов от более крупных кристаллов смещаются в сторону низких частот. Совместное рассмотрение спектров ЭМИ и САЭ, полученных в разных частотных диапазонах, дает дополнительную информацию о механизмах формирования сигналов. На рис.1 представлены спектры одновременно зарегистрированных ЭМИ и акустических сигналов на глубинах от 960 до 1660 м.

Графики спектров ЭМИ даны в относительных единицах к уровню на частоте 51 кГц. В интервале глубин 1240 – 1620 м, представленном вкрапленными магнетитовыми рудами, спектры как ЭМИ, так и САЭ существенно меняются по сравнению с вмещающими породами. При этом в ЭМИ резко увеличиваются амплитуды на частотах около 100 кГц, а в САЭ выше 500 Гц с максимумом примерно на частоте 1 кГц. Исходя из лабораторных данных на образцах, можно полагать, что спектр ЭМИ в данном случае отражает элементарные первичные акты образования микротрещин и тем самым состав, структуру пород, и конечно, действующие напряжения. Тесная связь спектров ЭМИ и САЭ ставит вопрос о том, как из элементарных актов разрыва формируются источники более низкочастотных сигналов САЭ. В дискретной по структуре среде, по-видимому, возникают последовательности элементарных актов разрушения, образующих соответствующие кластеры, которые и являются источниками упругих колебаний. Их размерные характеристики отражают спектры САЭ. Если это так, то огибающие сигналов ЭМИ должны флукутировать с частотами, близкими к выделяемым в САЭ. Спектральный анализ огибающей сигнала ЭМИ на частоте 100 кГц подтвердил такой вывод. А это, в свою очередь, свидетельствует о том, что в спектре ЭМИ во многих случаях будут частоты, совпадающие с наблюдаемыми в акустических трактах.

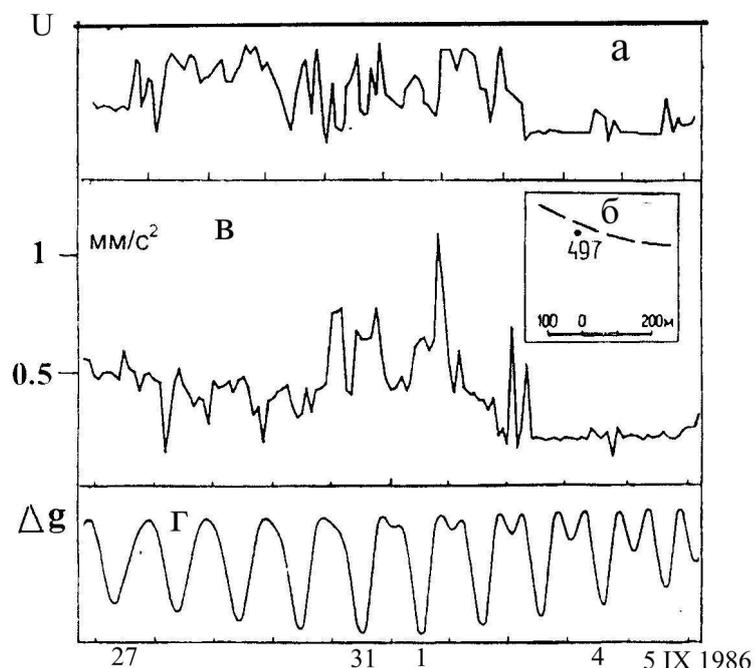


Рис.2 Временные изменения амплитудного уровня ЭМИ и САЭ: а – кривая уровня ЭМИ, мкВ, б – положение скважины относительно разлома; в – вариации уровня САЭ; г – теоретическая кривая приливных приращений силы тяжести.

При изучении временных вариаций САЭ пород в скважине № 497 Ломоносовского железорудного месторождения (Тургайский прогиб) вблизи разлома были включены и измерения ЭМИ. Регистрация временных вариаций ЭМИ и САЭ

в течение 11 суток осуществлялась двухканальной аппаратурой. Во временных вариациях огибающей сигналов ЭМИ в полосе частот 46-88 кГц был отмечен резкий спад амплитудного уровня (рис. 2, а), который повторяется таким же спадом в амплитудных изменениях САЭ (рис. 2, в), как и наблюдавшийся ранее на Среднем Урале в пределах Серовско-Маукского разлома. Данный спад интенсивности ЭМИ и САЭ является отражением современных

эндогенных процессов, выразившихся в релаксации тектонических напряжений в зоне разлома в виде крипа.

Следует отметить, что спад интенсивности во временных вариациях ЭМИ и САЭ произошел при переходе от сизигийского прилива к квадратурному, что видно на теоретической кривой приливных приращений силы тяжести, рассчитанной для координат местоположения Ломоносовского месторождения (рис. 2, г).

Проведенные исследования временных вариаций ЭМИ и САЭ показали, что при сравнительно слабых тектонических процессах с относительными деформациями, сравнимыми с приливными, в массивах возникает ЭМИ, и это явление можно использовать для изучения динамики земных недр не только в сейсмически активных, но и в сравнительно стабильных областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астраханцев Ю.Г., Троянов А.К., Дьяконов Б.П. Способ определения трещиноватости горных пород в скважинах. Патент 2150720 РФ, G01V3/18. – БИ, 2000, № 16.
2. Астраханцев Ю.Г., Троянов А.К. Способ обнаружения зон трещиноватых пород в скважинах. Патент 2173778 РФ, G01V3/12. – БИ, 2001, № 26.
3. Nitsan U. 1997 “Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks”. Res. Lett., v.4, № 8, pp. 333-336.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 08-05-01084.

УДК550.348.436;550.349.556.3

Влияние внешних геофизических факторов на вариации динамических показателей подземных вод

*Г.Е. Тукешова, факс:8(727)269-46-23, тел.:8(727)269-46-01, tgulziza@mail.ru
ТОО «Институт сейсмологии», 050060, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 75«А»*

Исследование взаимодействия и взаимообусловленности различных геофизических и гидрогеологических полей имеет важное значение в понимании природы различных аномалий геодинамических процессов. С этой целью анализировались данные, полученные на двух участках Алматинского прогностического полигона – Тургенском и Алматинском, где проводятся инструментальные наблюдения за деформацией земной коры. Первый участок представлен обсерваторией комплексного мониторинга Турген, гидрогеохимической (ГГХ) станцией Тау-Турген и гидрогеодинамическим (ГГД) пунктом наблюдения за уровнем подземных вод – Турген. Второй участок представлен обсерваторией Медео и гидрогеохимическими станциями Горельник и Алма-Арасан, расположенными соответственно в 8 и 23 км от нее. Исследовалась корреляционная связь между деформацией, уровнем подземных вод (УПВ), дебитом, вариациями H_4SiO_4 , CO_2 , а также наклонами по данным обсерватории Турген и уровнем подземных вод ст. Турген.

По ст. Турген в направлении северо-восток в начале 1995 г корреляция между УПВ и деформацией составляла 0.4-0.6. С июля месяца началось нарушение корреляции и ее полное исчезновение в течение с августа по ноябрь. В это время произошло Кегенское землетрясение энергетического класса $K=13.2$. До конца года корреляция так и не восстановилась. В 1997 г по этому же направлению наблюдается нарушение корреляции с конца июля до середины сентября, что связывается с периодом августовских землетрясений 1997 г. В 1998 г сильные землетрясения на полигоне не происходили, и нарушение корреляции не наблюдалось. В направлении северо-запад между деформацией и УПВ наблюдается такая же корреляция.

Корреляционный анализ наклонов и УПВ показал очень низкую связь между ними ($r=0.25$ при сдвиге на 70 дней и 0.15 на 100 дней). В связи с отсутствием часовых данных по УПВ на ст. Медео для анализа взят наиболее близко расположенный ГГД пункт Казачка.

Проанализированы данные за 1995 и 1997 годы. Корреляционный анализ рядов проводился по программе «модель Фактор» после очищения от влияния внешних факторов. Корреляция здесь неоднозначная. Коэффициент корреляции очень низкий, что говорит о том, что высокая корреляция имеет место из-за того, что на них воздействуют общие помехи.

На основе полученных данных установлено, что барическое поле является первичным и основным фактором, который одновременно обуславливает вариации параметров в геологических и деформационных полях. Из рисунка 1 видно, что в скважинах пьезометрический УПВ изменяется в противофазе с изменениями атмосферного давления ($P_{атм}$), причем наибольшая корреляция (r) между этими полями достигается с истечением некоторого времени (τ), которое необходимо для полного восприятия водоносным горизонтом атмосферного давления.

Влияние атмосферного давления на УПВ обусловлено передачей давления барического поля через толщу пород на водовмещающий пласт и непосредственным его воздействием на уровень воды в скважине [1]. Показателем этого влияния служит коэффициент барометрической эффективности B , который имеет следующий вид: $B = \Delta h / \Delta P_{атм}$, где Δh и $\Delta P_{атм}$ соответствующие изменения уровня воды и атмосферного давления. По данным массовых наблюдений в СССР и КНР этот коэффициент в основном составляет 3-7 мм/гПа при максимуме 9.4 мм/гПа [2]. Для максимального коэффициента корреляции r между УПВ и $P_{атм}$ в разные времена года величина сдвига τ во времени имеет сугубо индивидуальное значение. Обычно она колеблется от двух часов летом до 20-24 часов зимой, а в среднем для многих водопунктов – близка к 6 часам (рисунок 1), [3, 4, 5].

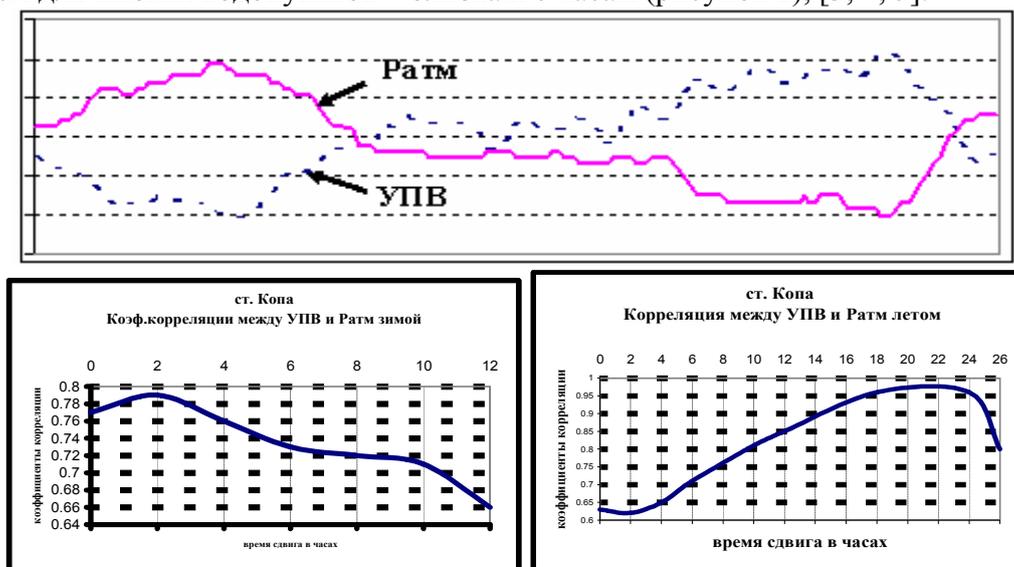


Рисунок 1

Исследование временного хода деформации и вариации УПВ ($H_{ур}$) по скв. Тургень, Горельник и Алма-Арасан показывает, что между ними существует определенная связь. Очищенные от влияния внешних факторов, а затем скоррелированные ряды деформации (ϵ) и УПВ ($H_{ур}$) за период 1990-1996 гг. показывают наличие тесной связи между ними с коэффициентом корреляции до 0.6-0.85 при некотором временном сдвиге τ , причем значение τ из года в год меняется. Так, если в 1996 г. При $r_{max} = 0,82$ значение сдвига τ составило 70 дней, то в 1997 г. оно равнялось 53 дням. В маловодном 1998 г. τ составило 130 дней.

На рисунке 2 представлен временной ход обработанных временных рядов наблюдений деформации на ст. Медео и Тургень, а также УПВ станции Медео за период 1988-1992 гг. Здесь отчетливо видна перестройка накануне сильнейших землетрясений 1990 и 1992 гг.

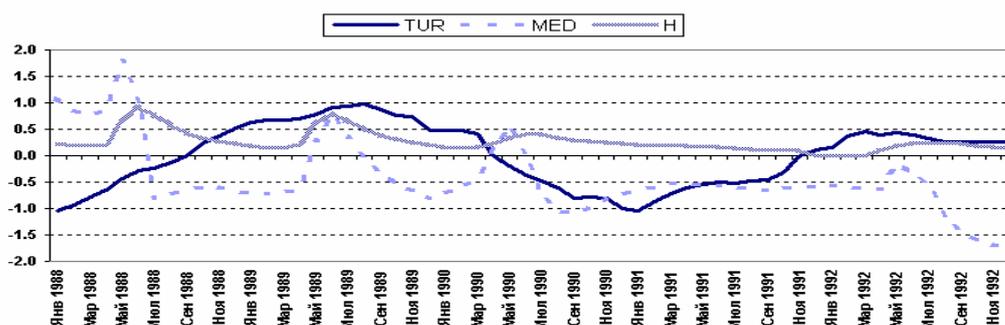


Рисунок 2. Изменение хода деформации в Тургене, Медео и УПВ Медео перед Байсорунским и Суусамырским землетрясениями (12.11.90г. $K=14.6$ и 19.08.92 г. $K=17$)

Выводы:

На данном этапе изученности можно отметить, что существует два варианта взаимодействия геополей: сначала происходит изменение ГГД параметра вслед за изменением барического поля, что вызывает сезонный деформационный процесс. Это является обычным фоновым явлением. Во втором случае наблюдается обратная последовательность. По-видимому, именно возникновение быстрого деформационного процесса, порождающего ГГД аномалии, представляет интерес как показатель напряженно-деформированного состояния земной коры и поэтому этот случай имеет прогностическое значение как индикатор геодинамической неустойчивости с активизацией сейсмического района и возможной реализацией сильного землетрясения. Изменение гидрогеохимических параметров является следствием как прямых деформационных, так и порожденных ими высокочастотных волновых полей. Изменение УПВ в скважинах с высокой приливной эффективностью может быть использовано для исследований непрерывных движений земной коры, т.к. в данном случае скважины будут работать как объёмный деформограф. Сеть из таких скважин в сейсмоактивных районах позволит получать реальную информацию о деформационных процессах в верхней части земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев А.У., Таймбетова Г.К. Результаты исследования режима подземных вод и гидрогеодинамических предвестников землетрясений.//Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. - Алматы, Эверо, 1997, - С. 221-236.
2. Мельхиор П. Земные приливы.//Москва, 1968, - 260 с.
3. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры.//Физика Земли, 1993, № 8, - С.59-69.
4. Любушин А.А. Мониторинг приливных вариаций УПВ в группе водоносных горизонтов // Физика Земли, 1997, №4, с,52-64
5. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений.//Вулканология и сейсмология. № 6. 1981. С. 74-105.

Низкочастотный электромагнитный шум техногенного происхождения

*В.И. Уткин, О.Л. Сокол-Кутыловский, Д.С. Тягунов
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

При измерении вариаций геомагнитного поля, связанных с солнечной активностью, и при работе с низкочастотными магнитными полями, несущими геофизическую информацию в различных методах электроразведки, необходимо считаться с влиянием магнитного шума техногенного происхождения, величина которого в связи с развитием промышленности, электроэнергетики и транспорта с каждым годом возрастает.

В последнее время регулярно публикуются прогнозы геомагнитной активности, сообщающие о спокойном или возмущенном состоянии магнитосферы Земли. Геомагнитная активность фактически оказалась включенной в группу риска для людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Во многих работах исследовалось специфическое влияние геомагнитной активности на организм, связанное с резонансом некоторых собственных частот организма человека (в диапазоне частот от 0,1 до 10-15 Гц) с частотой воздействующего внешнего магнитного поля [1, 2].

Техногенный электромагнитный шум с частотой 50 Гц, а так же воздействие высоких частот и сверхвысоких частот электромагнитных полей, активно исследуется медицинскими и санитарными службами. Допустимые электромагнитные загрязнения в этих диапазонах частот электромагнитного поля регламентированы санитарными правилами и нормами. Вариации магнитного поля техногенного происхождения в диапазоне низких частот 0,05-20 Гц практически не изучаются и санитарными правилами и нормами не регламентированы.

Источники техногенного электромагнитного шума низких частот можно разделить на первичные и вторичные. К источникам первичного техногенного электромагнитного шума низких частот в крупных индустриальных городах относятся: линии электропередач; электротранспорт, метрополитен, перемещение в пространстве и вращение магнитных масс с мощным энергетическим обеспечением (например: железнодорожный товарный состав может создавать магнитное поле 0,1 нТл на расстоянии до 20 км).

К вторичным источникам техногенного электромагнитного шума низких частот можно отнести: трубопроводы и другие протяженные металлические конструкции (физический механизм возникновения вторичного магнитного шума – возникновение электродвижущей силы индукции в проводнике под действием изменяющегося электромагнитного поля, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея); перемещение в пространстве и вращение металлических проводников (транспорт, промышленные и бытовые объекты и т.д., физический механизм которых – возникновение силы Лоренца в движущемся проводнике во внешнем магнитном поле).

С целью оценки величины электромагнитного шума в указанном диапазоне частот, создаваемого современным крупным промышленным городом в его черте и в окрестностях, а также на значительном удалении от него, были проведены измерения трех взаимно-ортогональных составляющих магнитного поля в трех пунктах: в городской черте Екатеринбурга (промышленный мегаполис), на расстоянии около 10 км от городской черты Екатеринбурга и в обсерватории АРТИ, на расстоянии приблизительно 150 км от Екатеринбурга [3].

На рис. 1 показаны примеры вариаций геомагнитного поля в указанных пунктах измерения. Продолжительность фрагмента записи вертикальной составляющей геомагнитного поля – 250 секунд (рис. 1). Запись проводилась в период относительно спокойного геомагнитного поля.

Как видно из представленных на рис.1а диаграмм, амплитуда максимальных вариаций вертикальной составляющей в пределах г. Екатеринбурга (ближе к окраине города) достигает величины 20 нТл, при средней величине около 10 нТл (в центральной части города значения вариаций достигают в 300-500 нТл и более). Удаление от источников индустриальных помех на расстояния около 10 км (рис.1 б) приводит к существенному снижению максимальных значений вариаций магнитного поля (до 1,5 – 2,0 нТл) при средней величине около 0,5 нТл. В пределах обсерватории АРТИ отражаются только практически собственные шумы измерительной аппаратуры (рис.1 в). Амплитуда вариаций собственных шумов составляет около 0,1 нТл.

Сопоставление амплитуд вариаций компонентов магнитного поля показало интересную особенность. В пределах города и на небольшом удалении от него амплитуда шума вертикальной составляющей магнитного поля значительно (на порядок и более) превышает величину шума горизонтальных составляющих. С увеличением расстояния от города

величины максимальных вариаций компонентов выравниваются, что свидетельствует об изменении природы источников техногенных шумов.

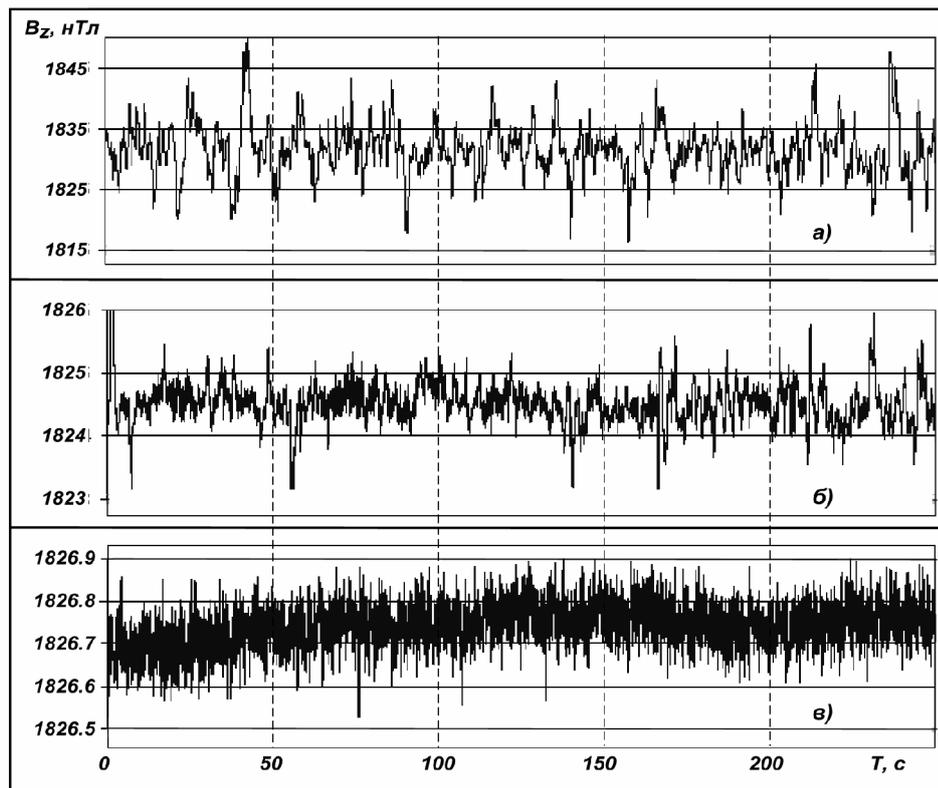


Рис.1. Диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) в пределах города Екатеринбурга (Юго-Западный район); б) при удалении на запад от первоначальной точки на расстояние около 10 км; в) на территории обсерватории АРТИ (расстояние от Екатеринбурга около 150 км).

Были проведены работы по измерению трех взаимно-ортогональных составляющих магнитного поля на больших расстояниях от мегаполиса в различных пунктах Свердловской области: в п. Висим, на расстоянии около 230 км от Екатеринбурга; в п. Верхотурье, на расстоянии 280 км от Екатеринбурга; в п. Кытлым, на расстоянии около 500 км от Екатеринбурга (рис. 2) [4].

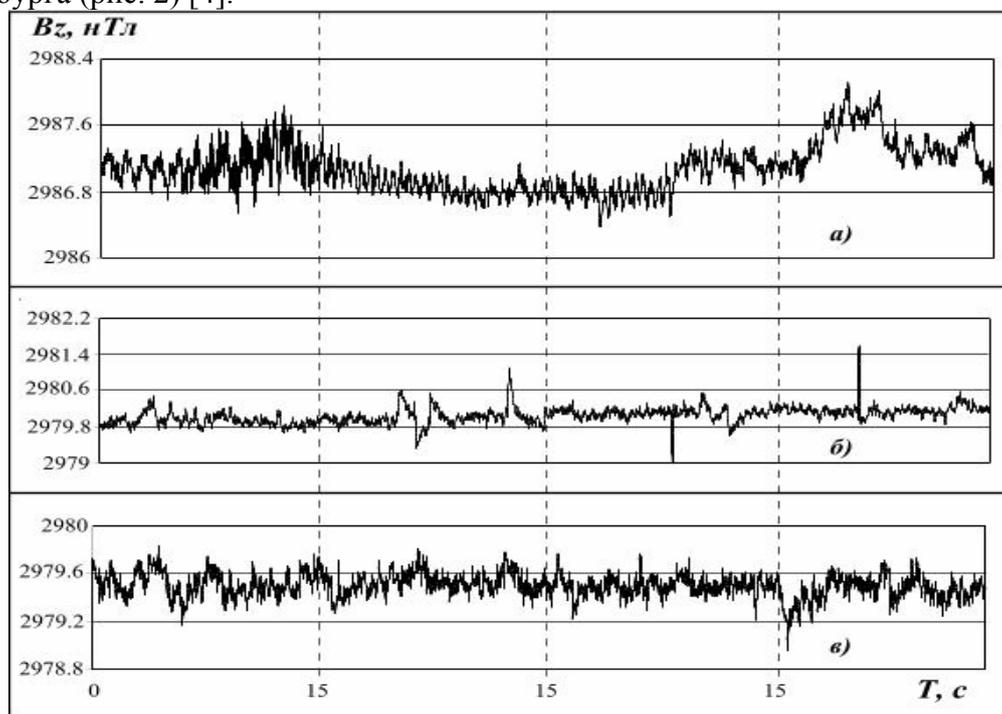


Рис. 2. Диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) в поселке Висим; б) в поселке Верхотурье; в) в поселке Кытлым

На рис. 2 показаны примеры вариаций вертикальной составляющей магнитной индукции в указанных пунктах измерения. Продолжительность фрагмента записи – 60 секунд (рис. 2).

Из представленных магнитограмм видно, что максимальная амплитуда вариаций в п. Висим и п. Верхотурье составляет 0,8 нТл, при средней величине около 0,4 нТл (рис. 2 а, б), в п. Кытлым – 0,4 нТл при средней величине около 0,2 нТл (рис. 2 в) и, примерно равны вариациям, наблюдаемых в обсерватории АРТИ при спокойной магнитосфере. Существенное снижение амплитуды на удаленных участках от мегаполиса объясняется тем, что на этих участках отсутствуют мощные источники техногенного происхождения, которые присутствуют в городской черте.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики электромагнитного поля в разных пунктах Среднего Урала.

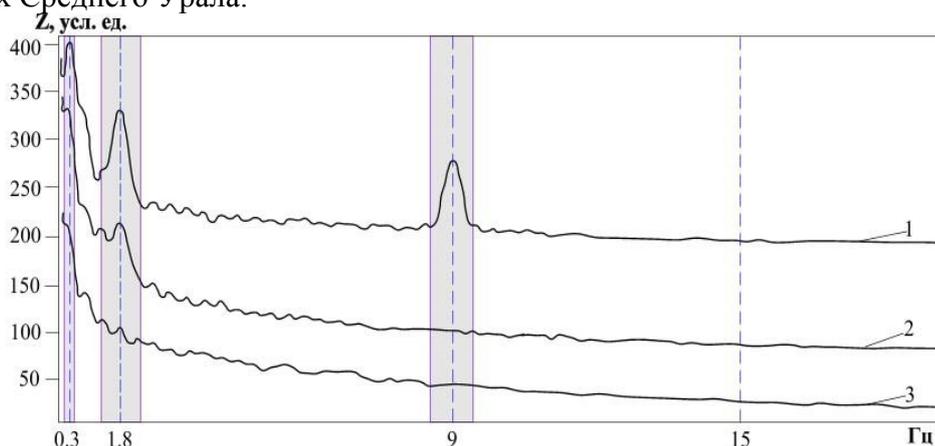


Рис. 3. Спектральные характеристики электромагнитного поля в пунктах Среднего Урала: 1- в поселке Висим; 2 – в поселке Верхотурье; 3 – в поселке Кытлым

На спектрограммах видно, что максимумы спектральной плотности электромагнитного шума отмечаются в п. Висим с частотами 0.3 Гц, 1.8 Гц и 9 Гц (рис. 3-1). В п. Верхотурье на всем интервале проявляется 1.8 Гц (рис. 3-2). В п. Кытлым явно выделенных частот не заметно, что свидетельствует об относительно спокойном электромагнитном поле (рис. 3-3).

Общий вид большинства спектрограмм Фурье-преобразования техногенного электромагнитного шума имеет вид как на рис. 3-3. Плотность электромагнитного шума плавно возрастает с уменьшением частоты. Этот вид шумовой характеристики соответствует так называемому спектру «розового шума».

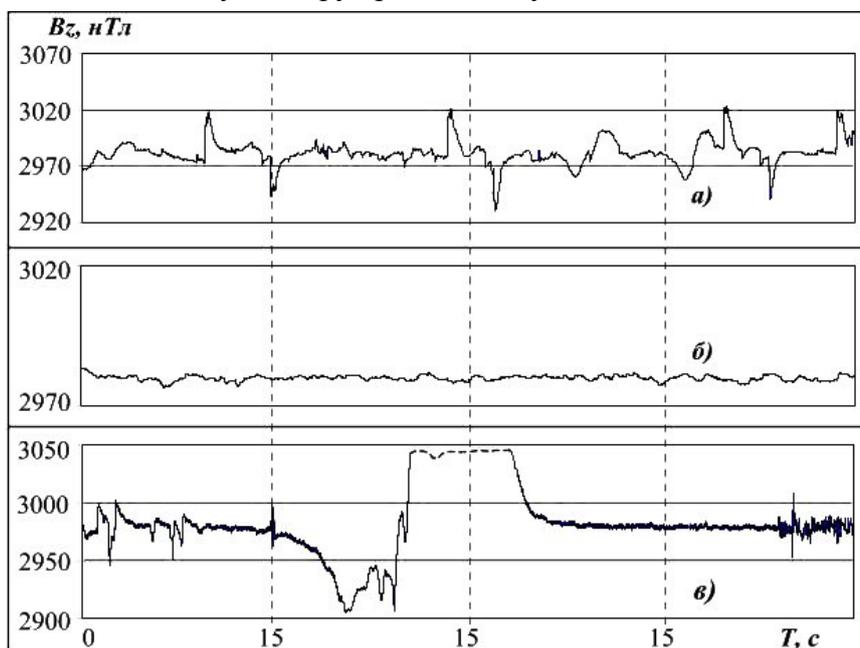


Рис. 4. Диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) вблизи проезжей части; б) удаление от проезжей части на расстоянии 300 м; в) с проезжающим рядом грузовым автомобилем

Проведенные специальные измерения в Екатеринбурге показали, что вклад в источники техногенного происхождения вносят автомобильный транспорт (рис. 4), жилищные комплексы с мощным энергетическим обеспечением (рис. 5).

Из представленных (рис. 4, а) магнитограмм видно, что вблизи проезжей части максимальная амплитуда вариаций составляет 80 нТл, при средней величине около 40 нТл. При удалении от проезжей части на расстояние 300 м значения вариаций резко снижаются и составляют 3 нТл (рис. 4, б). При измерении только с единичным грузовым транспортным средством (рис. 4, в) амплитуда вариаций составляет более 150 нТл. В результате проведенного эксперимента проводить измерения вблизи проезжающих транспортных средств не целесообразно.

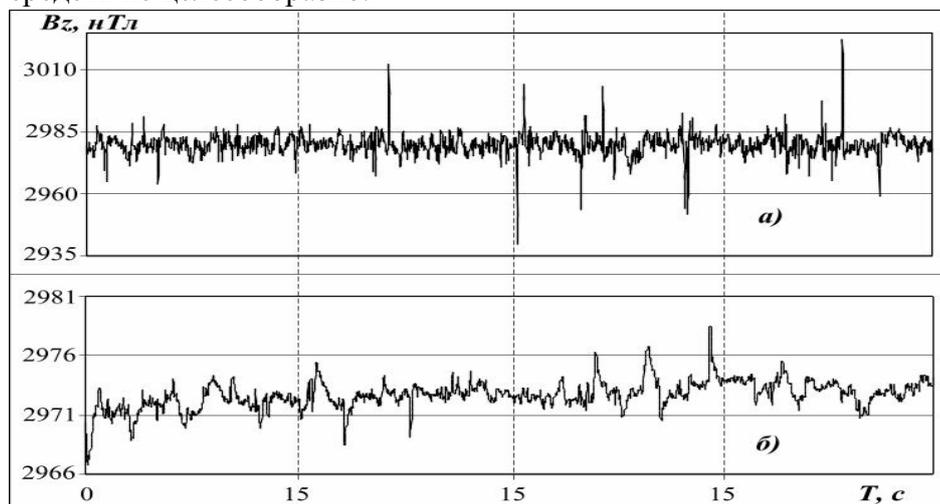


Рис. 5. Диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) у 9-ти этажного жилого дома; б) 35 м от 9-ти этажного жилого дома

Из представленных (рис. 5, а) магнитограмм видно, что у 9-ти этажного жилого дома максимальная амплитуда вариаций составляет 25 нТл, при средней величине около 10 нТл. При удалении от 9-ти этажного жилого дома на расстояние 35 м (рис. 5, б) значения вариаций составляют 4 нТл. Это свидетельствует о том, что вблизи жилых комплексов, как и промышленных предприятиях, имеется сильное электромагнитное поле низких частот, намного меньше используемой в сети электрического питания частоты 50 Гц.

Проведенные работы позволяют сделать следующие выводы:

- уровень магнитного шума в крупных мегаполисах (на примере Екатеринбурга) превышает уровень собственных шумов геомагнитного поля в исследованном диапазоне частот 0,05-20 Гц в тысячи раз. В соответствии с этим, та часть населения, что проживает в промышленных центрах и их окрестностях, постоянно находится под воздействием сильно возмущенного магнитного поля низких и особо низких частот;
- при обработке спектров шумов с помощью Фурье преобразования выяснилось, что плотность шума имеет преимущественно равномерное распределение по частотам с некоторым увеличением амплитуды в области низких частот (т.е. имеет вид «розового шума»);
- особенностью техногенных электромагнитных помех заключается в том, что вертикальная составляющая поля больше горизонтальной составляющей, а для вариаций естественного геомагнитного поля – наоборот, - горизонтальные составляющие поля, как правило, больше вертикальной составляющей электромагнитного поля, что свидетельствует о различной природе источников возмущающего поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Талалаева Г.В., Рождественская Е.Д., Уткин В.И., Рождественская М.В. «Конечное» знание и бесконечность мироздания: геофизика – наука у края бездны (человек и геофизика) // Материалы конференции «Космос и биосфера: Космическая погода и биологические процессы». Крымский научный центр НАН Украины, 2003. с. 184-190.

2. Холодов Ю.А. Мозг в электромагнитных полях. М.: Наука, 1982, 123 с. – (Научно-популярная серия).
3. Уткин В.И., Сокол-Кутыловский О.Л. Техногенный магнитный шум в пределах мегаполиса и удалении от него // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современные состояния: Материалы Международного семинара, Екатеринбург, 17-23 июля 2006 г. – Екатеринбург: институт геофизики УрО РАН, 2006. с. 173-175.
4. Тягунов Д.С. Изучение электромагнитного шума на Среднем Урале. XV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова. http://www.lomonosov-msu.ru/2008/06_9.pdf

УДК 550.343

Прогноз землетрясений. есть ли выход из тупика?

В.И. Уткин, А.К. Юрков, voutkin@mail.ru

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Землетрясения, приводящие к большим материальным потерям и жертвам, всегда вызывают повышенный интерес, как у сообщества ученых, так и, в особенности, у средств массовой информации (СМИ) и населения. Всех интересует один вопрос – можно ли было предугадать событие. Возможно ли осуществить краткосрочное предсказание землетрясения? Ученые изучают геофизические данные, а СМИ и население живо интересуются предсказаниями «нестандартной» науки: прорицателей, экстрасенсов и т.п. Так происходит много лет. Не было и исключением апрельское 2009 года землетрясение в Италии. Несколько недель после землетрясения Интернет был переполнен сведениями о предсказаниях этого события. Но, как правило, правильные прогнозы всегда публикуются после землетрясения. Мировое сообщество узнает о новых приборах, которые действуют на основе «непознанных» принципах, об аномальном поведении животных и т.п. Это продолжается много лет, и выхода из данной ситуации не предвидится. Можно констатировать, что наука о предсказании землетрясений зашла в тупик. Существует ли выход из этой ситуации? Это и обсуждается в данной статье.

Исследование возможностей прогнозирования землетрясений началось практически с началом широкой инструментальной регистрации сейсмических событий (Рикитаке, Reid). Исследования проводились в двух направлениях. Во-первых, изучение сейсмичности планеты, выявление сейсмоактивных регионов, их свойств и вероятностная оценка возможных событий, что привело к созданию стройной системы долговременного предсказания вероятности сейсмических событий для конкретных регионов (Кейлис-Борок, Соболев). Во-вторых, изучалась возможность краткосрочного (месяцы, недели, дни) прогноза землетрясений на основе аномального поведения геофизических полей (Соболев, Завьялов). Много лет изучается широкий спектр геофизических предвестников в верхней части земной коры и в атмосфере. В последние годы активно развивались спутниковые технологии дистанционного зондирования (Бондур, Дода), специально предназначенные для выявления признаков надвигающегося сейсмического события. Однако все эти методы и их комбинации так и не позволяют сегодня решить задачу среднесрочного и краткосрочного прогнозов землетрясений. Основная проблема состоит в том, что в различных сейсмоактивных регионах предвестники работают различно, иногда даже очень удачно и обеспечивают удивительно надежный прогноз события. Неудачи прогнозов обычно связывают как со сложностью организации очага землетрясения, так и условий его зарождения и развития. На основе этого заключения и под давлением успехов долгосрочного прогноза делается вывод, что прогноз землетрясений, как и прогноз погоды, по своей природе имеет вероятностный характер (Соболев, Завьялов).

Несмотря на большой объем полученной на сегодня информации следует признать, что в настоящее время не решены главные проблемы физики землетрясения, что не позволяет однозначно определить время, координаты и энергию сейсмического события.

К главным, нерешенным вопросам физики землетрясений следует отнести:

1. Как возникают условия накопления значительной упругой энергии трещиновато-пористой средой, каковой являются горные породы.
2. Какова причина сброса громадного объема энергии, который может происходить как единовременно, так и отдельными импульсами (серия землетрясений).
3. Что может служить триггирующим воздействием, вызывающим как одиночные события, так и серию событий?
4. Какова природа форшоковых и афтершоковых явлений, поскольку они не приводят к разрушению массива, как считалось до сих пор

Средне- и краткосрочные предвестники

Большинство существующих моделей подготовки тектонического землетрясения основаны, либо на модели, предложенной Рейдом еще в 1910 году (сброс упругой энергии вдоль тектонического разлома) (Рейд), либо на модели предложенной Рихтером (локальное снижение прочности вдоль разлома) (Рихтер). При этом предполагают детерминированное развитие событий от подготовки до возникновения тектонического землетрясения. Активно обсуждаются модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель) (Соболев) и дилатансионно-диффузионная (ДД-модель) (Scholz). Эти модели отражают в той или иной степени схемы Райда и Рихтера. Однако следует признать, что при всей детальности разработки этих моделей и дополнений к ним, учитывающих влияние, например, движения флюидов, указанные проблемы остаются нерешенными.

Можно отметить наиболее существенные на сегодня противоречия физических моделей тектонических землетрясений.

1. Существующая модель сжатия-разрушения (образование и развитие трещин) не позволяет накопить с последующей отдачей значительного количества упругой энергии.
2. Понятие о форшоках и афтершоках, как начале и окончании процессов разрушения массива, как предвестников и последствий землетрясения не выдерживает критики, поскольку разрушения массива при этих явления практически не возникает.
3. Неясно, как действуют, например, силы, вызываемые космическими явлениями (солнечные вспышки, магнитные бури) на накопление и сброс упругой энергии.

Решение этих и многих других вопросов на наш взгляд возможно, если принять гипотезу накопления упругой энергии за счет деформации изгиба (или кручения) массива горных пород.

Для пояснения этого предположения необходимо рассмотреть реальную ситуацию в сейсмогенерирующих районах земного шара

Многолетние сейсмологические наблюдения позволили составить прекрасные карты сейсмической опасности практически по всем сейсмоактивным регионам планеты. Анализ выделенных сейсмоактивных поясов показывает, что все разрушительные землетрясения связаны как с движениями литосферных плит или с движением крупных литосферных блоков внутри этих плит. Поскольку движение литосферных плит происходит в масштабе геологического времени, можно утверждать, что, во-первых, должны наблюдаться некоторые общие закономерности подготовки землетрясений; во-вторых, в ближайшие 100-200 лет никаких новейших аномальных сейсмоактивных регионов, вероятнее всего, не будет наблюдаться.

Известно, что все сильные землетрясения происходят только при взаимодействии отдельных двигающихся блоков (массивов), на их общих границах. Анализ движений литосферных блоков в сейсмогенных поясах показывает, что все многообразие наблюдаемых ситуаций возможно представить в виде всего трех моделей, связанных с подготовкой тектонического землетрясения и отражающих основные процессы движения литосферных блоков (плит). Это надвиг-взброс, сдвиг, сброс. Причем каждый из процессов

характеризуется определенной поляризацией сейсмических волн, что позволяет определить вид взаимодействия блоков. Сложные движения соответственно вызывают изменения в поляризационной картине.

Очевидно, что при описанных движениях за счет внутреннего трения по зонам сочленения литосферных плит, обязательно будут возникать **изгибовые деформации массивов** (Певнев). Эти деформации обладают двумя важными особенностями: а) за счет внутреннего сцепления отдельные блоки могут испытывать пространственное смещение, аналогичное деформациям изгиба, накапливая при этом упругую энергию; б) при такой деформации, когда макроскопического разрушения блока не происходит, не возникает разрушения массива, а возникающие микроскопические нарушения обеспечивают накопление упругой энергии.

Поскольку подавляющее большинство землетрясений находится в пределах тектонических швов, то очевидно, что источником накапливаемой энергии служит движение литосферных плит, которое в свою очередь является следствием процессов, происходящих во внутренних частях Земли, которые обеспечивают общую геодинамику литосферы. Возможные варианты наблюдаемых деформаций, возникающих при описанных процессах, представлены на рисунке 1

Движение континентальных плит (материков) – естественное состояние планеты и прекратится только с уменьшением энергии, подпитывающей это движение.

Представленные модели описывают практически все возможные варианты движений. Первые две модели (а, б), наиболее распространенные, соответствует зонам надвига и зонам субдукции: Тянь-Шань, Южная Америка, Индонезия, Япония, Камчатка и т.д. Вторая характерна для сдвиговых движений: разломы Сан-Андреас (США) и Северо-Анатолийский (Турция). Третья соотносится к вновь образующимся рифтовым зонам: Африканская, Мертвое море, Байкало-Алтайская, Чукотская и т.п.

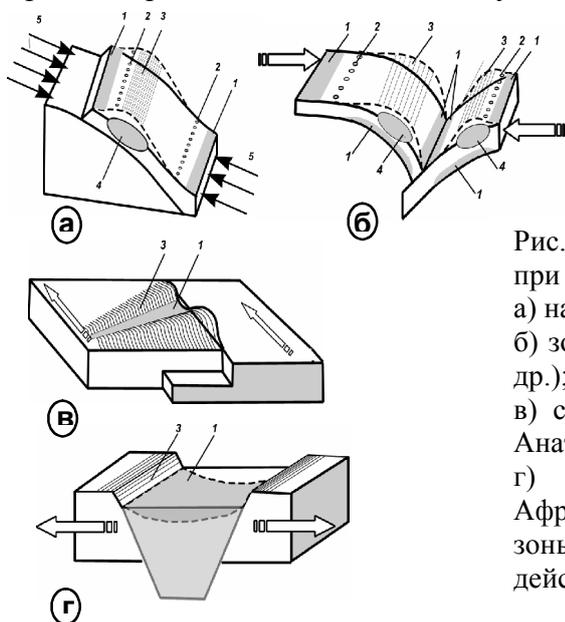


Рис.1. Схемы геодинамических деформационных процессов при подготовке тектонических землетрясений:

- а) надвиг-взброс (типично для Тянь-Шаня, Аляски);
- б) зоны субдукции (Курильские острова, Камчатка, Чили и др.);
- в) скольжение с трением (разломы Сан-Андреас, Северо-Анатолийский);
- г) сброс (зоны грабенов: Байкальский, Восточно-Африканский); 1- зоны сжатия; 2 – нейтральные зоны; 3 – зоны растяжения; 4 – зоны дилатансии; 5- направление действующих сил.

Общим процессом для всех моделей является межблоковое торможение за счет трения, что неминуемо вызывает деформацию блоков. При таких деформационных процессах блоки **не разрушаются**, поскольку прочностные свойства материалов блоков существенно выше, чем у зоны скольжения, но испытывают **изгибовые деформации**. Особенностью деформации такого вида является, во-первых, то, что этот вид деформации является **единственным, который может накопить упругую энергию без разрушения трещиновато-пористой среды**, каковыми являются литосферные блоки. Во-вторых, накопление упругой энергии будет происходить практически без видимых перемещений

блока, накапливающего энергию, что сразу же исключает из рассмотрения такой широко используемый предвестник, как регистрация расстояния между базовыми точками. Например, анализ данных GPS-мониторинга, проведенного на Северном Тянь-Шане (Зубович), показал, что все крупнейшие землетрясения Северного Тянь-Шаня находятся в зоне наименьших «вековых» движений по данным GPS.

Геофизическими параметрами, которые могут регистрировать деформацию изгиба, могут быть: электрическое сопротивление массива деформирующихся пород, изменение состояния подземных вод (изменение уровня, наличие аномальных перетоков воды по водоносным горизонтам и т.п.). Однако, как показывает наш опыт (Булашевич, Уткин) и опыт других исследователей (Woith), наиболее чувствительным параметром к изменению напряженно-деформированного состояния массива является изменение выхода (эксхалляция) естественного радиоактивного газа радона из поверхностных частей массива горных пород.

Сопоставление данных деформографа и радонового монитора, расположенных в одной точке измерений (Северный Тянь-Шань), показало, что при подготовке тектонического землетрясения относительная деформации массива составляет $n \cdot 10^{-8}$, а выход радона из массива может изменяться на 200-250% (Уткин).

Наиболее полные данные по радоновому мониторингу были получены (King Chi-Yu) в результате уникального эксперимента, проведенного Геологической службой США. Регистрация радона осуществлялась в 60-ти точках вдоль известной системы разломов Сан-Андреас-Калаверас-Хайворд. Разница в горизонтальных скоростях движения литосферных плит в этом районе достигает 38 мм/год: Тихоокеанская плита движется на северо-запад со скоростью 49 мм/год; Северо-американская в том же направлении, но со скоростью 11 мм/год (рис.2). Эти движения соответствуют предложенной модели типа рис.1в.. Очевидно, что при этом Тихоокеанская плита будет испытывать при ее торможении за счет внутреннего трения сильнейшие изгибовые деформации, которые неминуемо будут отражены в поле эксхалляции радона. На рис.2. показаны зоны изменения выхода радона перед землетрясением. На интерпретационный профиль (I-II) нанесены относительные изменения выхода радона по отдельным станциям. Видно, что наблюдаются явно выраженные зоны сжатия (уменьшение выхода радона) и растяжения (увеличение выхода радона). Эти зоны определяются изгибовой деформацией верхней части литосферной плиты. Всего было исследовано 25 событий и во всех случаях наблюдалась аналогичная картина (King Chi-Yu, Уткин). При этом эпицентры всех событий всегда находились в пределах зоны сжатия (или в зоне уменьшения выхода радона). Характерные изменения выхода радона (кривая 1-I. рис.2) показывают достаточно сложную геометрию деформаций. Кроме того, на основании этой кривой можно объяснить многие неудачные попытки использования радона, как предвестника тектонического землетрясения

Представленные рисунки объясняют и причину указанной неоднозначности поведения радона, как предвестника тектонического землетрясения. Очевидно, что если имеются зоны сжатия (уменьшение эксхалляции радона), то должны быть и зоны растяжения (увеличение эксхалляции) и «нейтральные», в которых изменения концентрации радона в почвенном воздухе не происходит. Следовательно, в зависимости от места расположения детектора радона относительно будущего эпицентра события, эксхалляция радона ведет себя по-разному при подготовке землетрясения. Действительно, как показывает опыт проведения радонового мониторинга в Северном Тянь-Шане (Уткин), детекторы радона, расположенные на взбросе, регистрируют увеличение эксхалляции радона (модель а, рис.1).

Из вышесказанного следует, что для успешного применения мониторинга радона необходимо предварительно построение геодинамической модели исследуемого региона, и определить возможные движения блоков их вероятную деформацию.

Форшоковые и афтершоковые события

Если принять модельдвигающегося массива, что в большинстве случаев и имеет место, то форшоковые и афтершоковые явления хорошо объясняются неустойчивым трением блоков (Scholz). Исследование процессов этого трения, выявило некоторые важные

особенности этого процесса. Во-первых, трение стимулирует деформационные процессы, которые могут привести к накоплению упругой энергии за счет изгибовых деформаций. Во-вторых, в реальных условиях может наблюдаться неустойчивость сил трения, вызванных различными внешними причинами, и возникать достаточно сложные процессы замедления и ускорения движения литосферных плит (крип - процесс). Этот вывод хорошо объясняет возникновение нескольких последовательных землетрясений, эпицентры которых расположены практически в одной точке. Согласно теории неустойчивого трения возможны три процесса: 1. Плавное скольжение по поверхности трения (SLIP – процесс); 2. Прерывистое скольжение, (крип-процесс) порождающее форшоковые и афтершоковые явления; 3. Отсутствие скольжения, накопление упругой энергии с последующей разрядкой в виде сейсмического события

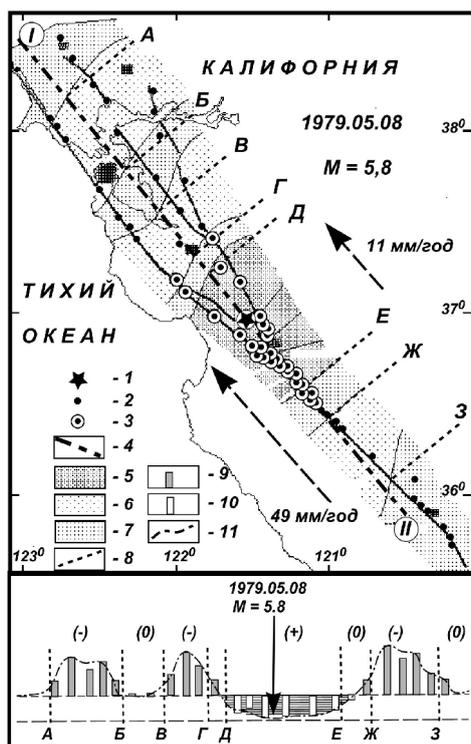


Рис.2. Результаты обработки данных [5] для события 5 августа 1979 года:

- 1 – эпицентр землетрясения;
- 2 – станции радонового мониторинга;
- 3 – станции, в области которых фиксировалось землетрясение;
- 4 – профиль интерпретации;
- 5 и 6 – зоны понижения и повышения выхода радона перед землетрясением, соответственно;
- 7 – «нейтральные» зоны;
- 8 – границы зон;
- 9 и 10 – относительное повышение и понижение выхода радона по отдельным станциям (проекция на профиль), соответственно;
- 11 – усредненная кривая изменения эксхалации радона перед землетрясением.

О кратковременных предвестниках землетрясения

Важным вопросом является проблема триггирования (принудительного сброса) упругой энергии, накопленной в процессе подготовки землетрясения. Если принять предложенную модель подготовки землетрясения, то можно утверждать, что на всех стадиях подготовки землетрясения, независимо от условий образования изгибовой деформации массива, возможен сброс упругой энергии под действием внешних сил.

Известно около 200 предвестников землетрясений различной природы от геодезических до космических. Общее для всех предвестников то, что, во-первых, они все в принципе могут воздействовать на процесс разрядки упругого напряжения; во-вторых, действие их сугубо избирательное, то есть они могут работать в одних ситуациях и не работать в других. Эти качества позволяют сделать вывод, что **предвестников, как таковых, в принципе не существует**. Все они являются источниками «спусковых механизмов» различного воздействия. Они могут вызывать событие, то есть быть настоящим предвестником, только в том случае, когда они воздействуют на земную кору, которая при своем движении и деформации оказалась в критическом («предсбросовом») состоянии. Например, можно утверждать, что не существует так называемых «ионосферных» предвестников землетрясения, а существуют быстро перемещающиеся возмущения ионосферы, которые в свою очередь вызывают появление атмосферных циркуляций, энергии которых вполне достаточно для триггирования землетрясения при прохождении фронта через сейсмогенную зону. Необходимым условием возникновения землетрясения является

тектоническая подготовка разломной зоны, то есть накопление в этом регион достаточно высоких тектонических напряжений. Сброс их и осуществляется быстро проходящим атмосферным фронтом, что равносильно мощному удару по поверхности Земли. В данном примере в процессе подготовки и развития землетрясения работают две мощные энергетические машины : 1. Движение литосферных плит, которое создает необходимые условия для накопления упругой энергии в системе блоков в трещиновато-пористой среде;. 2. Энергия солнечных вспышек, которая через возмущение ионосферы передается в барические возмущения атмосферы. Главным условием «триггирования» землетрясения следует считать «подготовку» литосферы, то есть накоплению в блоках значительной упругой энергии.

Условия накопления и триггирования могут быть существенно различны, поэтому и сброс энергии при землетрясении может создать как форшоки (афтершоки), так и катастрофических землетрясений.

В рассмотренной модели получает объяснение и так называемые периоды затишья перед событием. Такие «окна» затишья наблюдаются в пределах отдельного блока, который остается неподвижным в то время как вся система блоков продолжает движение. Выявление таких блоков возможно при регистрации малоамплитудных сейсмических шумов. Кстати на это обстоятельство неоднократно сейсмологами обращалось внимание (Korneev), хотя детальных исследований не проводилось ввиду высоких требований к объему и техническим требованиям к аппаратуре: необходимо достаточно большое количество сейсмических датчиков, регистрирующих события малой энергии.

О прогнозе землетрясений

Как показывает рассмотрение различных аспектов подготовки и возникновения землетрясения, последнее, как физическое явление, представляет собой многофакторный процесс. Тем не менее, возможно предложить алгоритм прогноза землетрясения. Схема этого процесса представлена на рисунке 3.

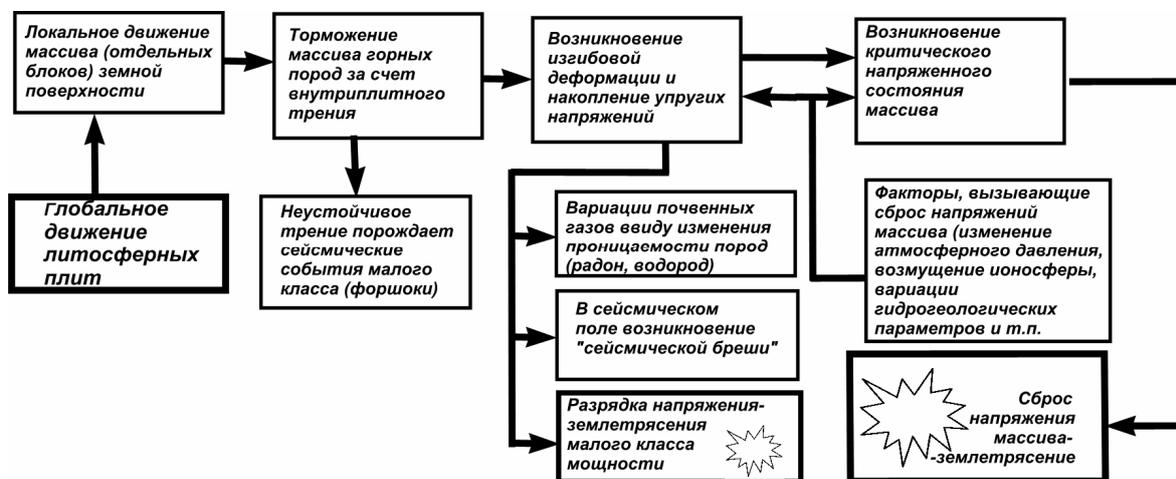


Рис.3. Схема процессов подготовки и землетрясения и сброса упругой энергии.

Локальное движение литосферных плит (блоков), определяется глобальными движениями в литосфере. При неустойчивом торможении локальных блоков (массивов) возникает накопление упругой энергии за счет изгибовой деформации. Возникающая деформация приводит к изменению напряженного состояния среды. При этом, оптимальным детектором изменения напряженного состояния среды следует считать поток почвенных газов, оптимальным из которых является радон, как легко регистрируемый и не имеющий послеследствия ввиду своего малого времени жизни. Дальнейшее развитие процесса накопления упругой деформации может проходить тремя путями:

Подготовка землетрясений определяется внутриземными процессами: возникающими в земной коре. Высокие механические напряжения (сжатии или растяжение массива)

фиксируются по выходу радона. При этом может наблюдаться и «сейсмическая брешь» при торможении локального литосферного блока. В этих условиях существует вероятность и разрядки напряжения, сброс относительно малой накопленной энергии и выделение ее путем серии мелких землетрясений. Дальнейшая деформация массива приводит к возникновению критического состояния среды, которое может, как самостоятельно привести к сбросу, так и под воздействием различных спусковых механизмов. Таким образом, процесс движения непрерывно порождает землетрясения различной энергии, в исключительных случаях катастрофические землетрясения.

Большую роль в данном процессе имеет внешнее воздействие. Оно может проявляться в различном виде. Самым сильным воздействием следует считать прохождение через сейсмогенную зону аномальных атмосферных фронтов или аномальных атмосферных циркуляций (Боков). Последние, в свою очередь, часто являются следствием ионосферных возмущений, вызванных солнечной активностью (Сытинский). В итоге получается, что землетрясения зарождаются в земной коре, но «повивальной бабкой» многих из них служит солнечная активность.

Из вышесказанного следует, что наиболее важной фазой в указанном процессе является подготовка и накопление в массиве напряжения упругой деформации изгиба. Поэтому этот процесс необходимо изучать в первую очередь при прогнозе землетрясений. Первым шагом в прогнозе должно быть выявление зон критического состояния среды, а затем необходимо анализировать возможные факторы триггирования. Только такой многофакторный алгоритм прогнозных исследований может привести к успеху в организации прогноза землетрясений.

Возвращаясь к началу статьи, можно сказать, что выход из существующего тупика в деле прогноза землетрясений существует, но он не такой простой и требует более высокого уровня мониторинга, особенно на поверхности Земли.

В заключение можно сказать, что, вероятно, необходимо сокращать работы по детальному изучению предвестников землетрясений (тем более, что это различные триггирующие факторы), а сосредоточить усилия по изучению процессов подготовки критического состояния среды, находящейся в напряженном состоянии.

Работа выполнена при поддержке Программы 16 Президиума РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Боков В.Н.* Изменение атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // СПб.: Известий РГО РАН, 2003. Т.135, вып.6, с.54-65.
2. *Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К.* Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясений // Доклады РАН, № 2, 1998, т.358, № 5, с.675-680
3. *Дода Л.Н.* Геосейсмическое эхо солнечных бурь или землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики, 2003, № 6, С.55-59.
4. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений : основы, методика, реализация / Ин-т физики Земли им. О.Ю.Шмидта.-М.: Наука, 2006, -254 с.
5. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Комплекс долгосрочных предвестников сильнейших землетрясений мира // XXVII Междунар. геол. конгр. (Москва, 1-4 авг. 1984). М.: Наука, 1984. Т.6. Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. С.56-66.
6. *Певнев А.К.* Пути к практическому прогнозу землетрясений . М.: ГЕОС, 2003. 153 с.
7. *Мячкин В.И.* Процесс подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
8. *Рикитакэ Т.* Предсказание землетрясений. Москва.МИР. 390 с.).
9. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. Лит. , 1963. 670 с.
10. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993, 314 с.
11. *Сытинский А.Д.* Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью. Л.: Гидрометиздат, 1987, 99 с.
12. *Уломов В.И., Мавшанов Б.З.* О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. 1967. Т.176, № 2. С.35-37.

13. Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В., Кривашеев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Физика Земли. №9. М.: 2006. с.145-155.
14. King Chi-Yu, Walkingstick C., Basler D. Radon in soil gas along active faults in Central California. Field studies of radon in rocks, soil and water. / Gunderson L. and Wanty R. editors / U.S. Geological survey bulletin: 1991. P. 77-133
15. Korneev, V.A., Seismicity precursors of M6.0 2004 Parkfield and M7.0 1989 Loma Prieta earthquakes, Eos Trans. AGU, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S53B-1097, 2005.
16. Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes // Bull/ Department Geol. Univ. Calif. Publ/ 1911. Vol. 6. N 19 P.413-444.
17. Scholz Christopher H. Earthquakes and friction laws // Nature. 391, 1998, pp. 37-42
18. Woith, H.; Pekdeger, A. (1995): Soil radon and non-tectonic effects: a contribution to the joint German-Turkish project on earthquake prediction research, Gas Geochemistry, Science Reviews, 135-146

УДК 550.834

Использование геотермических данных при построении плотностных разрезов земной коры

*Н.В. Федорова, И.В. Ладовский, В.А. Щанов
(343)2678885, факс(343)2678872 nataliavf50@mail.ru,
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Хорошо известно, что плотностной разрез земной коры практически невозможно построить без привлечения дополнительной информации. Прежде всего, это связано с принципиальной неоднозначностью решения обратных задач гравиметрии. Аномалии наблюдаемого гравитационного поля можно достаточно разумно объяснить распределением аномальных масс в приповерхностном слое, мощность которого составляет 10-15 км, так называемый «гравиактивный слой». В пределах уральских структур эта задача усложняется еще и тем, что аномалии, создаваемые глубинными источниками, в значительной степени компенсируются аномалиями, порожденными источниками в средней части разреза. Тем не менее, гравитационное поле, безусловно, содержит информацию: как о средней части разреза, так и от более глубоких горизонтов. Кроме того, при моделировании, как правило, используются редуцированные данные, в которых учтен гравитационный эффект за нормальное поле Земли. Однако в настоящее время не существует моделей нормального распределения плотности в земной коре различных регионов.

Петрофизическими исследованиями установлены достаточно устойчивые связи между теплогенерацией и плотностью пород земной коры. Данные геотермических исследований о тепловом потоке представлены по редкой сети измерений и получены в рамках одномерной модели. Стационарная часть теплового потока связана с радиогенными источниками тепла. При этом очень важно, что аномалии теплового потока имеют абсолютные значения и могут использоваться для построения «нормальной» модели плотностного разреза. Поэтому цель настоящих исследований состоит в разработке принципов комплексирования гравитационных и геотермических данных при построении плотностных моделей земной коры.

При моделировании строения земной коры широкое применение получил метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений или метод Цирульского [1]. Идея использовать при решении обратных задач теории потенциала такие классы источников, для которых легко построить эквивалентные источники, была высказана А.В. Цирульским в 1974 году [2]. Затем им совместно с Ф.И. Никоновой разработаны основы метода интерпретации аномалий для

класса ограниченных объектов и совместно с Н.В. Федоровой для класса границ раздела горизонтально слоистых сред. Метод основан на фундаментальных результатах теории эквивалентных решений обратных задач потенциала.

В двухмерном варианте метода аномальное гравитационное поле аппроксимируют полем набора двумерных пластин, а затем производится построение геометрических контуров эквивалентных источников при различных значениях плотности. Использование таких сингулярных модельных источников позволяет достаточно устойчиво разделять поля от разных объектов и определять их интегральные характеристики, такие как аномальная масса, центр тяжести и направление падения. Принимая во внимание принципиальную неоднозначность обратных задач гравиметрии, интерпретатор для каждого модельного источника может быстро рассчитать геометрические контуры ограниченных объектов или контактные поверхности слоистой среды для различных значений скачков плотности. Это позволяет оперативно конструировать и анализировать альтернативные варианты разреза, эквивалентные по создаваемому внешнему полю, что особенно важно при интерпретации геофизических полей по протяженным профилям в условиях недостатка априорной геологической и петрофизической информации. Метод применяется при региональных геофизических исследованиях для моделирования глубинного строения земной коры [3,4 и др.]. В процессе выполнения работ модернизировались существующие компьютерные технологии и их новые возможности использовались на практике.

Простое аналитическое выражение для решения прямой задачи геотермии позволяет эффективно реализовать алгоритм вычисления стационарных аномалий теплового потока для модельных источников, которые используются в методе Цирульского [5]. Использование данных о тепловом потоке может существенно повысить геологическую информативность плотностных разрезов. Резко градиентная зависимость между плотностью пород земной коры ($2,6 - 2,9 \text{ г/см}^3$) и их эффективной теплогенерацией ($2,4 - 0,004 \text{ мкВт/м}^3$) позволяет по расчетным значениям теплового потока выделить горизонтально-слоистые плотностные модели разреза до глубин 20 – 25 км.

Построение «нормальной модели» одномерного плотностного разреза сводится к вычислению суммарной теплогенерации одномерного теплового потока. Так если пачка горизонтальных слоев с плотностями ($2,6 - 2,8$) г/см^3 и мощностью ~ 20 км обладает суммарной теплогенерацией $\sim 24 \text{ мВт/м}^2$, то пачка слоев с такой же мощностью ~ 20 км, но с плотностями ($2,7 - 2,9$) г/см^3 будет иметь суммарную теплогенерацию в два раза ниже $\sim 12 \text{ мВт/м}^2$.

На рисунках 1 и 2 показан пример решения обратной задачи гравиметрии по широтному профилю на Урале, на котором не проводились сейсмические исследования. При выборе асимптот и построении границ раздела горизонтально-слоистого разреза при использовании геотермических данных становится возможным определение абсолютных значений плотности слоев земной коры.

Привязка к абсолютным значениям средней или фоновой плотности контролируется расчетной величиной суммарной теплогенерации. Так если плотность верхней части разреза будет $2,7 \text{ г/см}^3$, то среднее значение теплового потока будет $\sim 20 \text{ мВт/м}^2$; при плотности $2,6 \text{ г/см}^3$ получаем поток около 40 мВт/м^2 .

По результатам моделирования видно, что наиболее соответствующее геотермическим данным оказалось значение плотности $2,65 \text{ г/см}^3$, при котором график расчетных значений суммарной теплогенерации наиболее близко расположен от данных измеренного теплового потока, показанных точками (рис. 2). Таким образом, уже на начальном этапе комплексного моделирования просматривается простой и весьма информативный метод использования тепловых и гравитационных полей при региональных исследованиях. Тепловой поток для стационарных геотермических моделей позволяет рассчитать фоновое (среднее) значение плотности гравитационной модели и выбрать те решения из семейства эквивалентов, которые согласуются по теплофизическим и плотностным значениям искомым параметрам.

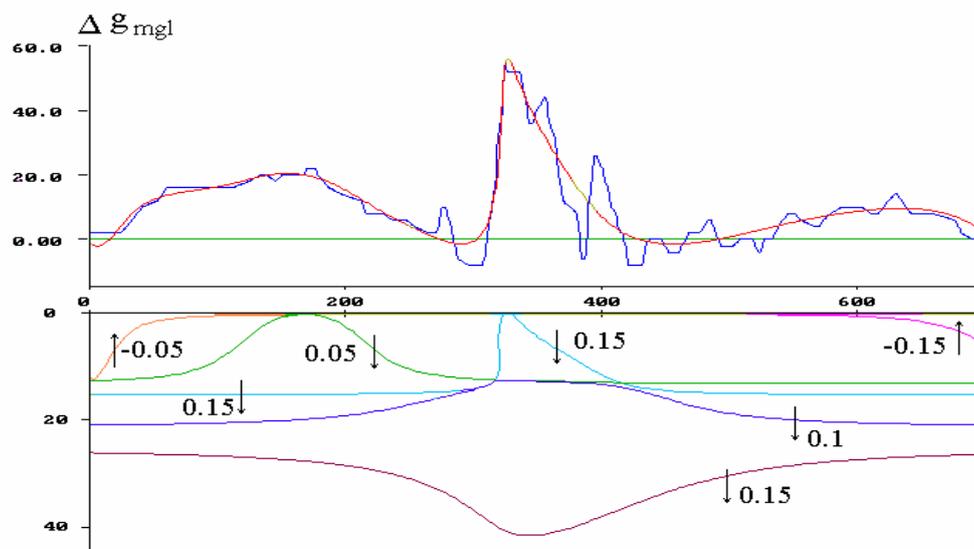


Рис. 1. Результаты моделирования распределения плотности по широтному профилю на Урале. В нижней части на разрезе приведены значения скачков плотности в г/см^3 на контакте между верхним и нижним слоями.

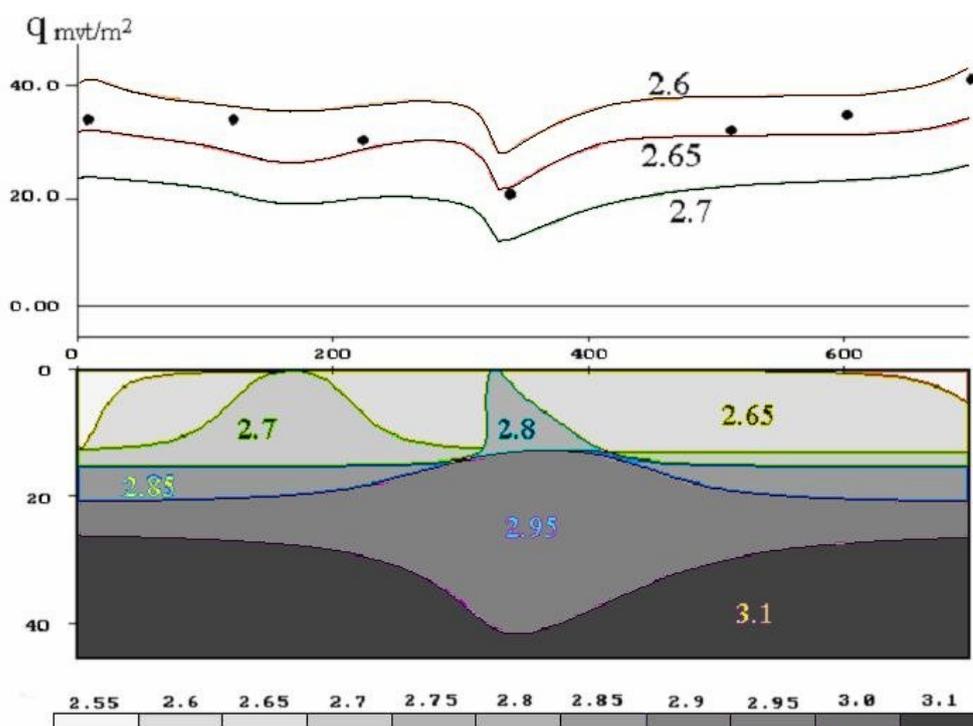


Рис. 2. Результаты моделирования теплового потока от разреза земной коры при различных значениях средней плотности пород коры. Значения измеренного теплового потока показаны точками. В нижней части на разрезе приведены абсолютные значения плотности в г/см^3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.
2. Цирульский А.В. О решении прямой и обратной задачи гравиразведки. // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1974. №7. С.84-90.

3. Федорова Н.В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит //Уральский геофизический вестник. Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2001. №2. С. 88-93.
4. Федорова Н.В., Шапиро В.А., Чурсин А.В. Гравимагнитная модель земной коры по профилю URSEIS //В кн. Строение и динамика литосферы Восточной Европы: результаты исследований по программе Европроба. Ред. А.Ф. Мороз, Н.И. Павленкова. М.: Геос. 2006 . С. 407-412.
5. Ладовский И.В., Никонова Ф.И., Семенов Д.Б. Об аномалиях гравитационного и магнитного типа в структуре тепловых полей. /Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Москва 2003, с.67-69.

УДК 550.311

Структура верхней части осадочного чехла на профиле г. Архангельска

В.И. Французова^{1,2} (8182)-21-55-68 vif@atnet.ru

А.В. Горбатиков³ avgor@mail.ru

К.Б. Данилов¹ (8182)-21-56-87 vif@atnet.ru

¹Институт экологических проблем Севера АНЦ УрО РАН, Архангельск, Россия.

²Учреждение Российской Академии Наук Геофизическая Служба РАН, г. Обнинск, Россия.

³Институт Физики Земли УРО РАН, Москва, Россия

Аннотация

В статье представлены результаты обследования структуры верхней части земной коры на профиле в г. Архангельске методом низкочастотного микросейсмического зондирования.

В настоящее время для изучения строения геологической среды широко используются различные модификации метода сейсмической шумовой томографии. Задачи, решаемые этими методами, включают большой круг сейсмологических исследований, в том числе, выявления детальной и тонкой структуры скоростей сейсмических волн, глобальной, региональной и локальной пространственной структуры и характерных размеров неоднородностей и расстояний между ними.

Целесообразность применения основных модификаций сейсмической томографии зависит от характеристик: неоднородностей их форм, глубины, контраста по отношению к вмещающей среде, неоднородности вмещающей среды, возможности комбинировать исследования с привлечением различных геофизических, геохимических и геологических методов [1].

Особый интерес, по нашему мнению, представляют методы оценки структуры среды по записям фоновых низкочастотных микросейсмических колебаний, в частности, метод низкочастотного микросейсмического зондирования, разрабатываемый в Институте Физики Земли [2]. В отличие от широко распространенных в мире технологий, использующих микросейсм и основанных на анализе скоростей дисперсионной картины с помощью сейсмических малоапертурных групп, в этом подходе рассматривается распределение амплитуд микросейсм в частотном диапазоне от сотых долей Герца до нескольких Герц на определенном полигоне над исследуемым объектом с помощью переносного датчика. По идеологии данный подход напоминает магнитотеллурическое зондирование, но использует механическое шумовое поле вместо электрического. Подход может быть использован в ряде проблем, связанных с изучением интрузивных структур, разломных структур, геологических объектов нефтегазового комплекса (разведки и оценки запасов), обследования строения осадочной и кристаллической земной коры в нефтеносных районах, поиск второго, нижнего нефтеносного этажа под известными крупными месторождениями Крайнего Севера, морского шельфа и т. д. [3].

Обработка данных измерения сведена к расчетам статистически устойчивых спектров во всех точках намеченного профиля. После получения статистически устойчивых спектров в точках профиля для каждой частоты результирующих спектров построена карта амплитудных распределений в каждой точке профиля в зависимости от глубины, рассчитываемой для осадочного слоя, с учетом оценочной величины скорости волн Релея $V_R = 750$ м/с.

Обсуждение результатов

Архангельская область представляет собой уникальный природный полигон для изучения природных и техногенных микросейсм. Природные и низкочастотные микросейсмические явления связаны, прежде всего, со штормами и волнениями на морских акваториях Северных и Белого морей. Они регистрируются станциями организованной Архангельской сетью наблюдений, предоставляют материал для проведения сейсмических исследований строения земной коры и литосферы. Можно отметить, что имеющиеся сейсмологические данные о строении земной коры на территории Архангельской области крайне скудны, если не считать проведенных с большой тщательностью многочисленных сейсморазведочных работ в местах сосредоточения твердых (алмазы, бокситы и др.) и жидких (углеводороды) ископаемых.

В этой связи начатые в ИЭПС работы с использованием методов шумовой сейсмической томографии по изучению структуры земной коры и литосферы достаточно актуальны.

В указанном направлении в качестве рекогносцировочного проведено изучение структуры осадочного чехла на профиле в г. Архангельске. Цель исследований – проверка эффективности метода низкочастотного микросейсмического зондирования на профиле с имеющимися данными бурения скважины на территории г. Архангельска (Кузнечиха) [5-7].

Краткий обзор публикаций о строении геологической среды Беломорского геоблока, в пределах которого находится г. Архангельск, свидетельствует о том, что расположение геоблока на Северной окраине России и место ее сочленения с Балтийским кристаллическим щитом обуславливает в коре двух резко обособленных структурных этажей: сложнодислоцированного архей-нижнепротерозойского фундамента и осадочного чехла, в верхней части над которым располагаются четвертичные отложения.

Породы фундамента вскрыты несколькими скважинами на глубинах 511-860 м, среди которых наиболее приближенной к району наших исследований является Архангельская (по разным данным Архангельская -2, Кухничиха) скважина, пробуренная по информации разных авторов до глубины 511, 534, 535.8 м [5-7].

На основании сравнительно редкой сети скважин и по аналогии с открытыми участками Балтийского щита предполагается, что фундамент сложен породами Беломорского комплекса архея (амфиболитовая фация метаморфизма), которые залегают по геофизическим данным на глубине 0.5 - 3.0 км [6].

В основании земной коры предположительно находится переходной коромантийный слой с пониженными скоростями.

В целом, в фундаменте развиты контрастные структуры, горсты и авалонгены северо-западного простирания.

В осадочном чехле, залегающего на породах фундамента, выделяются верхнепротерозойские образования, в состав которых входит Валдайская серия Венда, включающая в пределах низовья реки Северная Двина Падунскую свиту, состоящую из песчаников, алевролитов, аргиллитов, со вскрытой мощностью согласно [4] 435 м.

По данным [5] вендские отложения повсеместно распространены на площади с размывом и несогласием, залегая на породах рифея или кристаллическом фундаменте. Падунская свита представлена красноцветными песчаниками, алевролитами, реже встречаются прослойки красно-коричневых аргиллитоподобных глин. Мощность свиты согласно [4] в пределах Валдайской серии Вендских отложений 186м.

Четвертичные отложения сплошным чехлом перекрывают нижележащие толщи венда. В их составе аллювиальные, озерные, морские и ледниковые осадки неоген – четвертичного и раннечетвертичного возраста. Мощность четвертичных отложений варьируют от 250 м до долей метра, по данным [4] мощность их от 20 до 100 м.

По проведенным нами измерениям на профиле и обработки данных измерений получена СВАН- диаграмма распределений амплитуд микросейсмического поля (волн Релея) по глубинам и эпицентральному расстоянию (рис.2).

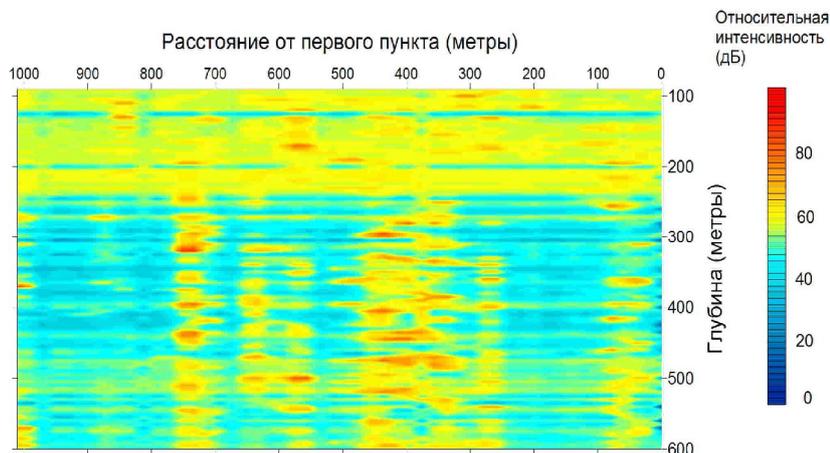


Рисунок 2 - Структура верхней части осадочного чехла на профиле "Набережная Северной Двины - ул. Обводный канал" (г.Архангельск)

Анализ структуры амплитудного распределения позволяет выделить на исследуемом участке осадочного чехла предположительно две границы: одна на глубине от 230 до 240 м, отделяющая слои с более пониженными скоростями, чем в подстилающем слое., еще один слой намечается в диапазоне глубин от 470 до 520 м также с пониженными скоростями, но не равным скоростям в верхнем слое. Согласно вышеописанным геологическим данным можно предположить, что первая граница может быть отнесена согласно [4] к нижней границе Падунской свиты в пределах Валдайской серии Вендских отложений. (мощность 186 м + 20 м ÷ 100м четвертичных отложений), вторая граница - к границе кристаллического фундамента вскрытого Архангельской скважиной (Архангельской, Архангельская -2, Кухничиха по данным разных авторов) на глубине 534- 535.8 м [6, 7].

Таким образом, по нашему мнению, полученное хорошее согласие сведений о структуре осадочного чехла в районе г. Архангельска с данными бурения скважин позволяет полагать, что наряду с полученными ранее свидетельствами [2,3], метод низкочастотного зондирования является достаточно надежным методом и потому может применяться при обследовании участков с геологическими неоднородностями, например, такими, как зоны алмазонасных трубок, углеводородных месторождений и др., а также при изучении структуры верхов земной коры.

В заключение отметим, что полученные нами обнадеживающие результаты, позволяют продолжить указанным методом исследования неизученных участков территории области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А. В. Проблемы геотомографии // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 4-38.
2. Горбатилов А. В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Новый подход к исследованию геологической среды на основе использования фонового микросейсмического поля в диапазоне низких частот // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Матер. межд. конф. Казань: Казанский государственный университет, 2007. Т II. С. 19-23.
3. Горбатилов А. В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных

исследований и моделирование // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Матер. межд. конф. Петергоф, 2006. С. 66-71.

4. Геология СССР. Т. II. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР / Часть 1. Геологическое описание. М., 1963./ ред. издания Саламатина З.Д., Власов И. С. 1077 с.

5. Ширококов В. Н. Алмазоносные районы юго-восточного Беломорья / Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.гл ред. Юдахин Ф. Н. С. 35 -48

6. Кутинов. Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-физических материалах. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, ОАО "ИПП Правда Севера", 2004. 268 с.

7. Зоричева А. И. Север Русской платформы // Геология СССР. Т. II. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР / Часть 1. Геологическое описание. М., 1963./ ред. издания Саламатина З.Д., Власов И. С. 1077 с.

УДК 550.311

Аномалии вариаций интенсивности квазигармонических наводок на записях сейсмических станций

В.И. Французова^{1,2} (8182)-21-55-68 vif@atnet.ru

Е.В. Иванова² (8182)-21-56-87 vif@atnet.ru

¹*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск, Россия*

²*Учреждение РАН Геофизическая Служба РАН, г. Архангельск, Россия*

Микросейсмический фон на записях сейсмических станций, помимо естественной компоненты, практически всегда содержит в той или иной степени и антропогенную, представленную разного рода специфическими колебаниями, являющимися проявлениями хозяйственной и бытовой деятельности человека. На записях трех станций Архангельской сейсмической сети – «Тамица», «Пермогорье» и «Климовская» - периодически фиксируются помехи типа наводок, представляющие собой квазигармонические сигналы выраженной на волновых формах амплитуды, с резким передним и задним фронтом, и характеризующиеся узкими спектральными пиками в диапазоне от 4 до 5 Гц [1, 2]. Исследования показали, что их источником служит работа лесопильного оборудования типа Р-63, которым оснащены деревообрабатывающие цеха, расположенные в окрестности наших пунктов регистрации на расстоянии нескольких километров от них [3].

Оказалось принципиальным, что пыльная рама указанного типа требует массивного, заглубленного на величину порядка 1,5 м постамента для размещения двух основных частей агрегата - вертикальной станины с узлами массой до нескольких тонн, и асинхронного двигателя серии 4А, мощностью 30-45 кВт, с частотой вращения порядка 750 об/мин и массой до 400 кг. По нашему мнению, именно наличие значительного по площади и заглублению фундамента у пилорамы является главной причиной влияния ее работы на подстилающую среду - известно [4], что при жестком креплении электрической машины к фундаменту вибрация машины, передаваясь на фундаментную плиту, может превратить последнюю в источник шума и помех. Т. е. мы фактически имеем мощный излучатель сейсмических колебаний, частота которых определяется либо частотой биений двигателя, либо резонансной частотой колебаний массивного постамента, либо и тем и другим вместе. Причем вероятнее первая версия, поскольку фундаменты на разных пилорамах, как показало обследование, все-таки не идентичны, а вот частоты наводок на разных станциях очень близки (например, помеха с частотой около 4,89 Гц наблюдается на записях всех трех станций).

Т. о., благодаря стечению обстоятельств мы получили уникальную возможность наблюдать за источниками периодической модуляции верхней части земной коры в пунктах регистрации Архангельской сети и исследовать их влияние на геологическую среду. Для этого представилось необходимым, прежде всего, изучить основные параметры, характеризующие интенсивность квазигармонических наводок на сейсмозаписях - амплитуду и частоту, а также закономерности их временных вариаций (изучение их пространственного распределения требует проведения отдельных исследований в виде полевых работ и планируется в будущем). Некоторые результаты мы приводим в настоящем сообщении.

Как отмечено выше, сигнал в области изучаемых наводок характеризуется наличием в его спектре узких выраженных пиков в частотном диапазоне от 4 до 5 Гц. На записях каждой из трех сеймостанций фиксируются по два основных пика, которые имеют 2-ю, а иногда и 3-ю гармоники. Такое число пиков обусловлено тем, что в одном цехе установлены, как правило, две пильные рамы одного типа, незначительно отличающиеся по некоторым техническим параметрам. В рамках настоящей работы мы рассмотрим наводки только с частотой 4,89 Гц, поскольку она является общей для всех трех пунктов регистрации и представляет интерес в плане наличия возможности провести сравнительный анализ. Для работы с данными привлекались программные комплексы обработки цифровых данных: специализированный WSG, стандартный Microsoft Excel, а также оригинальные разработки, используемые в сейсмологической лаборатории ИЭПС УрО РАН. Во всех исследуемых пунктах регистрации установлено стандартное оборудование в составе регистраторов типа SDAS и трех короткопериодных датчиков СМЗ-КВ. Расстояние между пилорамой и сеймостанцией составляет: для «Пермогорья» 2,34 км, для «Тамицы» - 1,46 км, для «Климовской» - порядка 1,82 км.

Главной особенностью поведения частоты спектрального пика является флуктуация его максимума около указанного значения в пределах 0,01-0,1 Гц [1]. Прежде всего, был оценен годовой ход изменения максимума частоты пика с целью исключить возможную связь этих вариаций с сезоном года. Для этого каждая из выбранных определенным образом на разных станциях наводок (на горизонтальном канале SHE, где она лучше всего проявляется) была разбита на трехминутные участки с последующими замерами на них максимальных значений частоты, а затем охарактеризована медианным значением этих максимальных частот. Полученная для некоторого числа наводок (n=50) совокупность медианных значений была представлена в виде графиков, отдельно для каждой из станций (рис. 1).



Рисунок 1. Вариации по сезонам года медианных значений частот, характеризующих квазигармонические наводки на записях трех станций Архангельской сейсмической сети (канал SHE).

Видно, что изменение частоты пика практически для каждого сезона распределено по частотной полосе, ширина которой минимальна для «Тамицы» - примерно 0,06 Гц и максимальна для «Пермогорья» - около 0,08 Гц. Влияния сезонности не просматривается. Ширина полосы частот наиболее вероятно обусловлена параметрами источников квазигармонических наводок, впрочем, нельзя исключить и относительность расстояния «пилорама - сеймостанция», либо особенности передающей сигнал среды на этой трассе. Последние предположения требуют дополнительных исследований.

Затем, было оценено распределение величин частоты пика в течение времени одной квазигармонической наводки, также по записям горизонтального канала SHE. На записях каждой из станций было выбрано определенное число наводок, каждая из которых была разбита на односторонние участки (в общей совокупности, по разным случаям, их было набрано $N \sim 400$) с последующими замерами на них максимальных значений частоты. Затем было построено распределение этих величин по данным каждой из трех станций (рис. 2). Во всех трех случаях распределение оказалось близким к нормальному, причем, как и следовало ожидать, его дисперсия прямо пропорциональна ширине полосы частот, в которой варьирует максимум пика (рис. 1). Видно, что в действительности пик приходится не на величину 4,89 Гц, а смещен к значению 4,92-4,95 Гц.

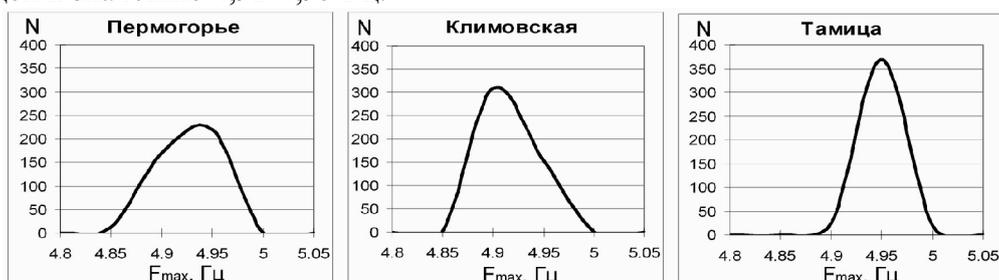


Рисунок 2. Распределения максимумов флуктуирующего спектрального пика в течение времени одной квазигармонической наводки по совокупности разных случаев на записях трех станций Архангельской сейсмической сети (канал SHE).

Однако, в ходе исследований выяснилось, что изменение частоты пика в течение времени одной квазигармонической наводки все-таки не совсем случайно. Построение СВАН-диаграмм сигнала в указанной области показало, что она флуктуирует в течение времени работы лесопильного оборудования вполне определенным образом (рис. 3).

Так, на записях «Тамицы» ярко видно, что флуктуация частоты в области наводки происходит периодически, и, без сомнения, соответственно совершению нескольких распилочных циклов за время работы агрегата (для других станций наблюдается

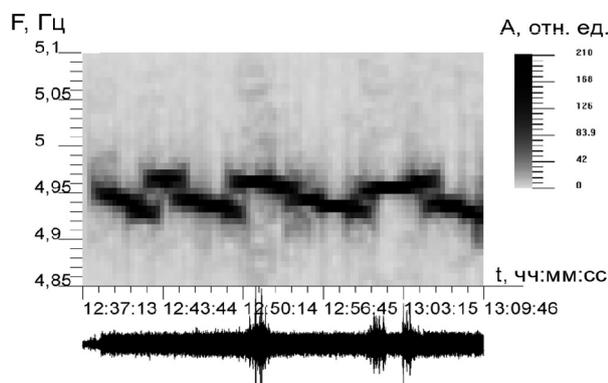


Рисунок 3. СВАН-диаграмма и соответствующая ей волновая форма сигнала в области наводки, зарегистрированной сейсмостанцией «Тамица» 12.01.2007, с 12:37 по 13:09 GMT канал SHE.

аналогичная, но гораздо менее выразительная картина). Причиной такого поведения является, скорее всего, изменение рабочей нагрузки двигателя с началом и окончанием каждого распилочного цикла. Нормальность же распределения величин частоты пика вызывается тем, что и число, и длительность распилочных циклов в течение времени работы агрегата - случайные величины. Кстати, заметим, что особенности сигнала, обусловленные распиловкой материала, разного по плотности, диаметру, типу и длине должны хорошо проявляться именно на СВАН-диаграммах.

В качестве второй основной характеристики интенсивности квазигармонических наводок на записях мы рассматриваем спектральную амплитуду. Для нее также прежде всего оценили годовой ход изменения в области наводки, по той же схеме трехминутных интервалов на канале SHE (рис. 4). При этом здесь и далее мы не делали вычитания из спектральной амплитуды величины, обусловленной вкладом природного фона микросейсм в диапазоне 4-5 Гц, поскольку ее вклад весьма незначителен – порядка 1% от максимального значения [5].

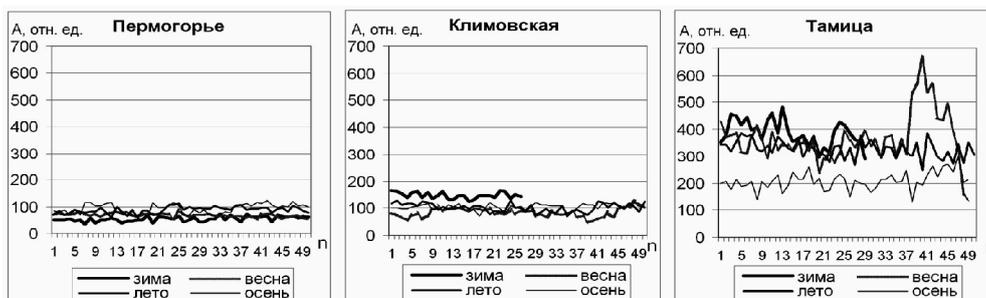


Рисунок 4. Вариации по сезонам года медианных значений спектральной амплитуды, характеризующих квазигармонические наводки на записях трех станций Архангельской сейсмической сети (канал SHE).

Видно, что имеется значительный разброс значений в зависимости от сезона на «Тамице», в то время как на других станциях он невелик. Можно предположить, что это связано с модификациями лесопильного оборудования в течение времени наблюдений, либо с особенностями геологической среды в месте расположения этой станции. Косвенно на последний факт указывает и преобладание амплитуд наводок в зимнее время над таковыми, замеренными в другие сезоны года, на этой же станции и на «Климовской». На «Пермогорье» наоборот, как раз зимой наблюдаются самые низкие уровни амплитуд наводок. Дополнительные исследования позволят решить этот вопрос однозначно.

Затем, нами было оценено распределение максимальных значений амплитуд в течение времени одной квазигармонической наводки по вышеупомянутой схеме одноминутных интервалов (рис. 5). Так же, как и максимумы частоты, максимумы спектральных амплитуд распределены в течение одной наводки практически во всех случаях по закону, близкому к нормальному. И хотя для «Тамицы» исследуемое распределение имеет большую дисперсию и вызывает сомнения в принадлежности именно к этому типу, проверка его по такому критерию как числа Вестергарда показала его близость к гауссовскому. Опять же, как и следовало ожидать, дисперсия распределения оказалась прямо пропорциональной ширине разброса амплитуд в сезонных вариациях (рис. 4).



Рисунок 5. Распределения максимумов спектральных амплитуд в течение времени одной квазигармонической наводки по совокупности разных случаев на записях трех станций Архангельской сейсмической сети (канал SHE).

В силу того факта, что при импульсном техногенном воздействии на среду мы имеем дело с перераспределением в ней энергии [6], и зная, что квадрат амплитуды сигнала и его энергия взаимосвязаны, мы позволили себе по распределению максимумов спектральных амплитуд в разных областях наводок на сейсмозаписях качественно оценить энергетическое воздействие наших источников квазигармонических наводок. С этой целью мы строили графики функций распределения логарифма частоты N - частоты возникновения максимумов спектральных амплитуд в определенных участках записи – от величины $\lg A_{\max}^2$, являющейся аналогом энергии. В качестве материала для исследований взяли данные станции «Пермогорье» за август 2005 г., в связи с тем, что в этот период там интенсивно работала только одна пильная рама с интересующей нас частотой наводок 4,89 Гц, и можно было исключить воздействие второй основной наводки. Замеры максимальных амплитуд (в мкм/с) делались в пяти одноминутных участках записи каждой наводки следующим образом: первый замер – непосредственно перед началом помехи на волновой форме, второй –

непосредственно на начале, третий – в середине наводки, четвертый – на самом конце и, наконец, последний, пятый – непосредственно сразу после окончания наводки на волновой форме. Эти замеры были произведены для 60 выбранных наводок, наблюдавшихся в течение нескольких дней в начале месяца, по трем регистрирующим каналам. Полученная совокупность значений и была подвергнута статистической обработке по получению графических представлений функций распределения (рис. 6 и 7).

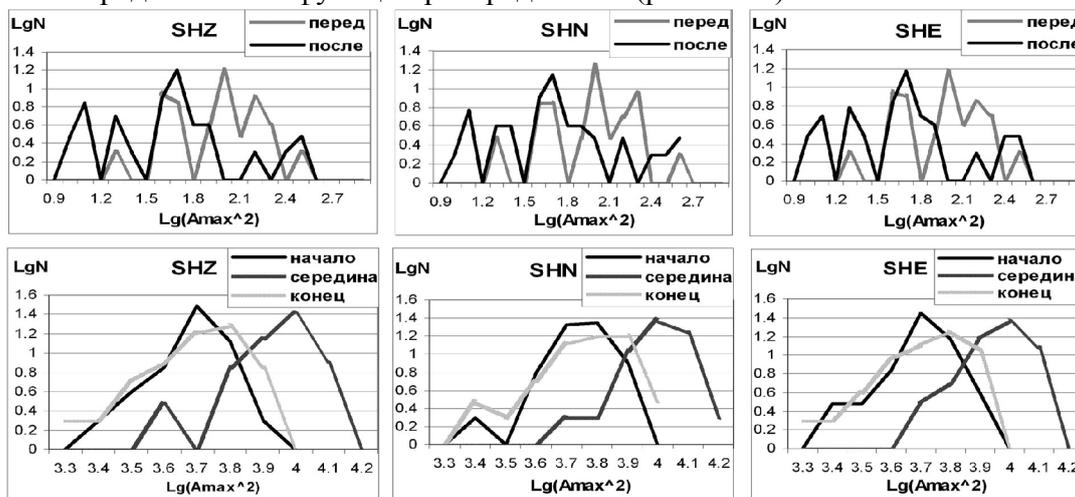


Рисунок 6. Распределение логарифма числа максимумов спектральных амплитуд по величине $\lg A_{\max}^2$ для трех регистрирующих каналов SHZ, SHN, SHE станции «Пермогорье», в пяти различных участках квазигармонической наводки с частотой 4,89 Гц (пояснение в тексте).

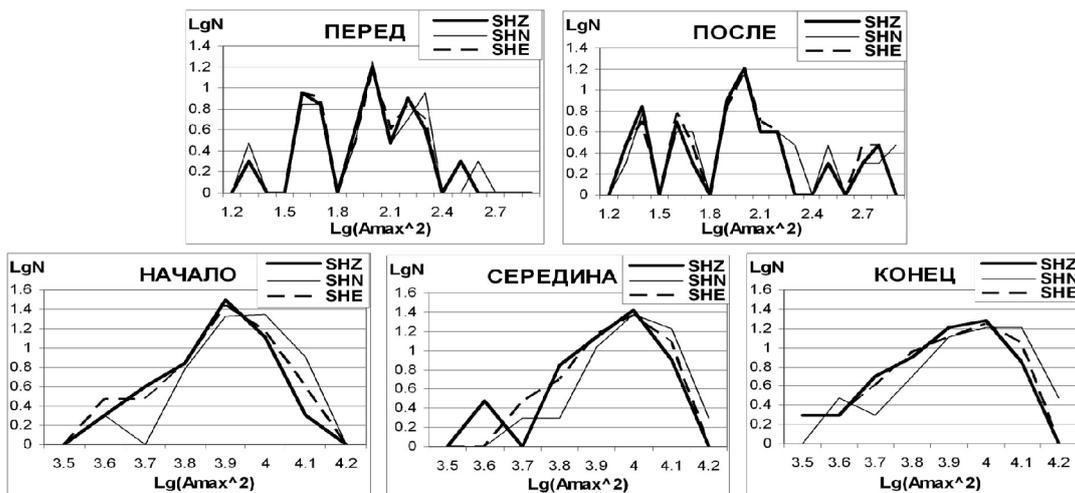


Рисунок 7. Распределение логарифма числа максимумов спектральных амплитуд по величине $\lg A_{\max}^2$ в пяти различных участках квазигармонической наводки с частотой 4,89 Гц (пояснение в тексте), по трем регистрирующим каналам SHZ, SHN, SHE станции «Пермогорье».

Из анализа рисунка 6 можно заключить, что по всем трем регистрирующим каналам энергия фона непосредственно перед наводкой выше, чем после нее, а в области самой наводки преобладает ее срединная часть. Отсюда следует, что большая часть энергии от воздействия источника помех выделяется в среду в момент максимальной нагрузки агрегата, т. е. обусловлена параметрами источника, и что наличие такого источника позволяет среде перейти на более низкий энергетический уровень, т. е. снять часть имеющегося напряжения. Разница в уровнях энергии фоновых участков и участков наводки - почти два порядка. Из анализа рисунка 7 видно, что воздействие проявляется преимущественно по горизонтальному каналу SHN, т. е. в направлении «север-юг», что обусловлено, во-первых, поверхностным расположением источника наводок, а во-вторых, почти меридиональной

протяженностью трассы сигнала «пилорама-сейсмостанция» для пункта регистрации «Пермогорье».

Итак, вариации интенсивности квазигармонических наводок на записях сейсмических станций могут быть интерпретированы непосредственно как проявление изменений, происходящих в их источнике, а косвенно – как индикатор воздействия источников такого рода на подстилающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Французова В.И. Об одном типе наводок на записях сейсмических станций Архангельской сети / В. И. Французова, Е. В. Иванова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Мат. Второй международной сейсмологической школы. – Обнинск, 2007. - С.194-198.
2. Французова В.И. Динамика помех квазигармонического типа на записях сейсмических станций Архангельской сети / В. И. Французова, Е. В. Иванова // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Мат. и докл. Всерос. конф. с междунар. участием.- Архангельск, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с экрана.
3. Французова В.И. Об источнике периодической модуляции верхней части земной коры в пунктах регистрации Архангельской сети / В. И. Французова, Е. В. Иванова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Мат. Третьей международной сейсмологической школы. - Обнинск, 2008. - С.202-206.
4. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. / И. Г. Шубов. - Л.: «Энергия», 1973.- 200 с., ил.
5. Конечная Я. В. Сезонные изменения микросейсмического поля на записях сейсмостанции «Тамица» / Я. В. Конечная, В. И. Французова // Экологические проблемы Севера: мат. докл. Молодежной научной конф. - Архангельск, 2008. - С.51-54.
6. Капустян Н.К. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. / Н. К. Капустян, Ф. Н. Юдахин. - Екатеринбург, 2007. – 415 с.

УДК 550.311

Анализ регистрационных возможностей сейсмических станций Архангельской сети

В.И.Французова^{1,2}, А.Н.Морозов^{1,2}

¹Геофизическая служба РАН, сектор сейсмического мониторинга севера Русской плиты, г.Архангельск, Россия

²Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г.Архангельск, Россия

Проблема контроля сейсмических событий включает в себя несколько частных задач: обнаружение – установление факта возникновения сейсмического источника, локализации и времени его возникновения, распознавание природы источника (землетрясение или взрыв). В перечисленных задачах первоочередной является регистрация события, при этом предъявляются свои специфические требования к аппаратуре, организации сети станций, методике обработки данных. Из перечисленного следует, что при организации сети наблюдений важно оценить эффективность регистрации сейсмических событий, зависящих как от особенностей мест установки станций, геологических условий под станциями, конфигурации сети относительно регистрируемых событий, наличия (интенсивности) микросейсмического фона, рассматриваемого как помеха, что, в конечном счете, отражается на качестве записи (зависит от соотношения сигнал/помеха). Это важно, прежде всего, для сейсмических сигналов, поскольку форма конкретного сейсмического сигнала известна с большим приближением, сейсмическая энергия распределена в относительно широком частотном диапазоне, момент возникновения сигнала неизвестен, геологическая среда, в которой распространяются сейсмических волны, неоднородна.

Задача разработки теоретических и методических основ оценки магнитудной чувствительности сейсмических сетей возникла и решалась большим коллективом авторов [1] в 80-е годы прошлого столетия в связи с необходимостью оценки эффективности отечественных и мировых сетей, задействованных для регистрации и опознания ядерных взрывов сейсмическими методами.

Суть разработанной методики [1] заключается в построении кривой магнитудной чувствительности $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta)$, т.е. зависимости магнитуды с 50% ($P=0,5$) вероятностью обнаружения, от эпицентрального расстояния Δ , и кривой обнаружения $P = P(m, \Delta)$, т.е. вероятность, для заданных значений магнитуд и эпицентральных расстояний, обнаружения сигналов. Кроме того, имеется возможность оценить магнитудную чувствительность пункта регистрации для заданных значений Az , т.е. рассчитать кривую чувствительности вида $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$, где Az - азимут подхода сейсмических волн к регистрирующей станции. По двум кривым (магнитудной чувствительности и обнаружения) оценивается вероятность обнаружения сигнала для заданных m , Δ и Az . В совокупности, данные кривые представляют своеобразный технический паспорт пунктов регистрации сейсмической сети.

В данном сообщении представлены результаты расчета кривых обнаружения и чувствительности вида $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$ для станций Архангельской сети наблюдений: «Климовская», «Пермогорье», «Тамица» и «Архангельск» [2].

Расчет для каждой сейсмической станции (с/с) кривой магнитудной чувствительности производился с использованием каталога, зарегистрированных на станциях землетрясений как минимум за годовой цикл наблюдений, во-первых, чтобы иметь достаточно представительный объем исходных данных, и, во-вторых, чтобы средний уровень помех за период наблюдений с равным весом отражал все сезоны года. При этом отсеивались землетрясения с глубиной более 70 км, чтобы избежать поправок за учет глубины. Затем для нахождения величины магнитуды $m_{0,5}$ с шагом 200 км стационарный каталог сравнивался с каталогом Геофизической службы РАН и строились кривые чувствительности, представленные на рис. 1а-г.

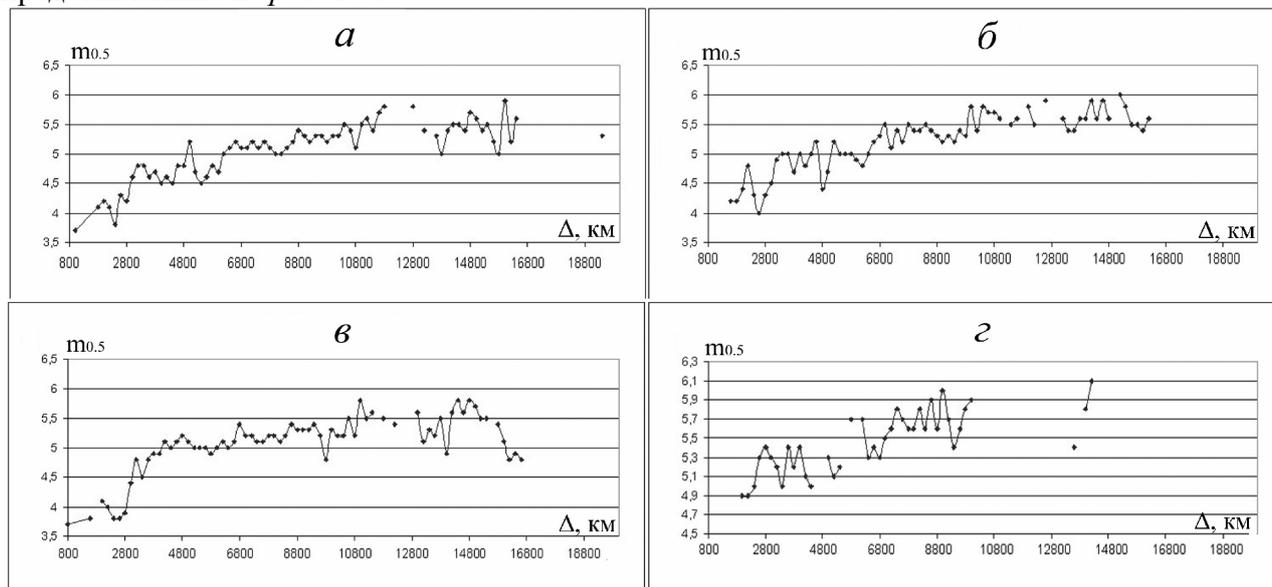


Рис.1 – Кривые магнитудной чувствительности сейсмических станций: а – «Климовская»; б – «Тамица»; в – «Пермогорье», г – «Архангельск»

Согласно графикам (рис. 1) значения магнитуд $m_{0,5}$ для $\Delta_1 = 800-3000$ км и $\Delta_2 > 9000$ км равны соответственно на с/с «Климовская» – 3.7 – 4.25, 5.0 – 5.9; на с/с «Пермогорье» – 3.7 – 4.1, 4.9- 5.8; с/с «Тамица» 4.2-4.8, 5.4-6.0; на с/с «Архангельск» – 4.9, 5.4-6.1. Для

значений $\Delta = 8000-9000$ км $m_{0,5}$ определяется, соответственно, величинами для с/с «Климовская» $m_{0,5} = 4.8 - 5.2$; «Пермогорье» – $4.9 - 5.6$; «Тамица» – $5.2 - 5.8$.

Максимальная чувствительность отмечается для с/с «Климовская» и «Пермогорье» на региональных расстояниях ($\Delta \leq 2000$ км) в пределах значений $3.7 - 4.0$, т.е. в этом диапазоне эпицентральных расстояний магнитудная представительность этих станций равна 4.0 , что отмечалось ранее [3].

Площадное распределение чувствительности для с/с «Климовская», «Пермогорье», «Тамица» и «Архангельск», рассчитанные по формуле $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$ с шагом 20° дано на картах (рис. 2а-г).

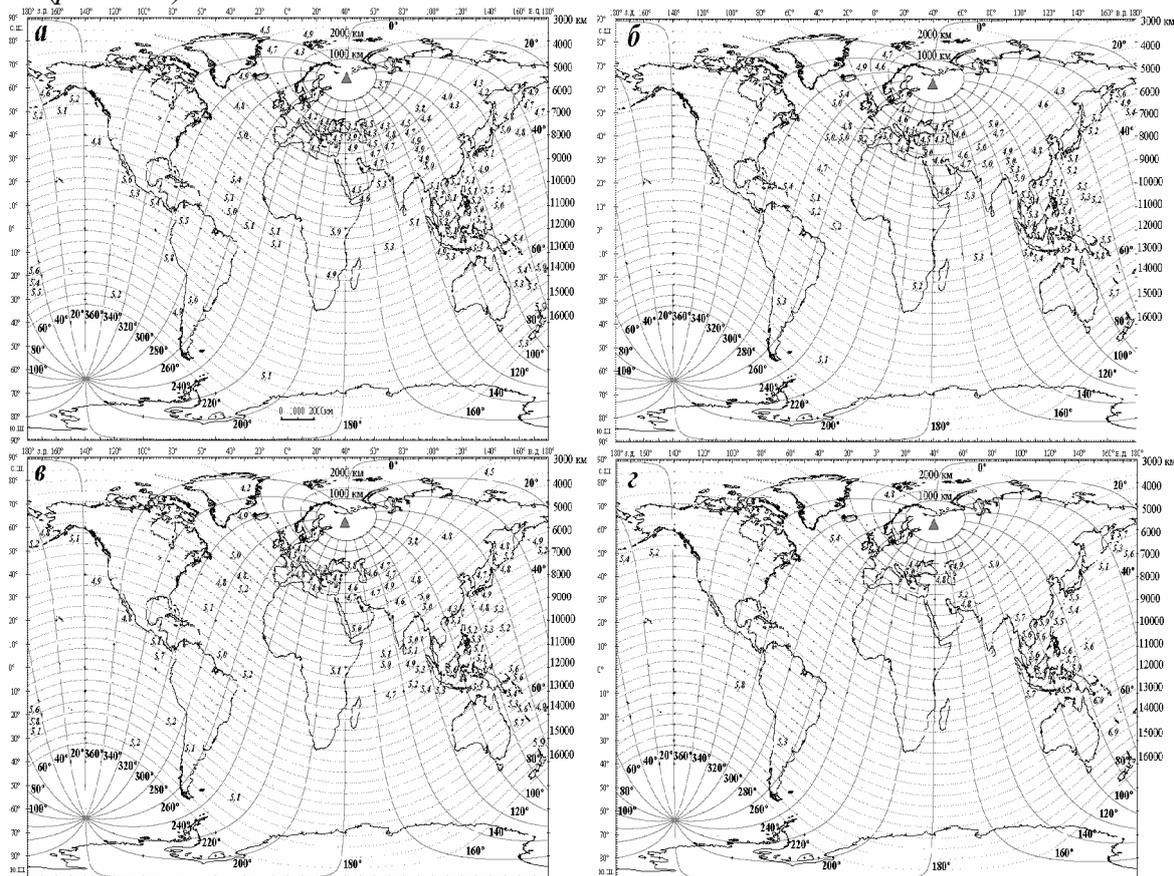


Рис. 2 – Карта распределения функции $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$ в зависимости от эпицентрального расстояния и азимута подхода сейсмических волн для сейсмических станций: а – «Климовская»; б – «Тамица»; в – «Пермогорье», г – «Архангельск»

Анализ карт помогает получить представление о возможностях регистрации конкретной станцией землетрясений из разных эпицентральных зон. Отметим следующие закономерности в распределении чувствительности $m_{0,5}(\Delta, Az)$:

- Значения функции плавно возрастают с увеличением Δ в пределах всего рассматриваемого диапазона Az ($0^\circ - 360^\circ$), однако, их величины для всех станций меньше в пределах азимутального створа $0^\circ - 180^\circ$, т.е. минимальный порог магнитуд, с которого все станции регистрируют землетрясения из эпицентральных зон, находящихся восточнее станций Архангельской сети, на $0.6 - 0.7$ единиц меньше, чем для зон, находящихся западнее сети;
- наименьшие значения $m_{0,5}(\Delta, Az)$ отмечаются для с/с «Климовская», особенно в азимутальном створе $Az = 0^\circ - 180^\circ$, где чувствительность станции определяется минимальными значениями магнитуды $3.7 - 4.0$;

- всеми станциями наилучшим образом регистрируются землетрясения с $m=5.0$ практически во всем диапазоне эпицентральных расстояний ($\Delta = 3000-17000$ км); однако в пределах региональных расстояний ($\Delta < 3000$ км) часто регистрируются сейсмические события с $m = 4.0$;
- для землетрясений из эпицентральных зон, находящихся западнее сети ($Az = 180^\circ - 360^\circ$), наблюдаются случаи повышения уровня чувствительности, что может свидетельствовать о наличии каналов, благоприятных для распространения сейсмических волн. Например, для с/с «Климовская» таких каналов два: на $\Delta = 8000-9000$ и $13000-15000$ км; для с/с «Пермогорье» они наблюдаются на $\Delta = 9000-10000$ км и $13000-17000$ км.

Построение кривой обнаружения для станций Архангельской сети осуществлялось с помощью формулы, полученная в работе [1], учитывающей основные факторы, определяющие вероятность обнаружения сейсмических сигналов на фоне помех:

$$P(m, \Delta) = \Phi \left[\frac{m - m_{0.5}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2}} \right] \quad (1)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-\frac{x^2}{2}) dx$ - функция Лапласа. (2)

Коэффициенты σ_i характеризуют изменчивость обнаружения сигнала в зависимости от специфических особенностей пункта регистрации и для каждой станции находятся экспериментально. Например,

- величина σ_1 - учитывает случайный характер разности фаз колебаний микросейсм и сигнала. Оценивают величину σ_1 исходя из следующей простой модели. Пусть на некотором интервале времени имеется сигнал с амплитудой A_1 и помеха с амплитудой A_2 , такой же частоты, тогда единственной переменной будет являться разность фаз θ . Дисперсия логарифма амплитуды $A(\theta)$ равна:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} [\lg(A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos \theta - \lg(A_1^2 + A_2^2))]^2 d\theta$$

- величина σ_2 учитывает медленные вариации уровня микросейсм по изменчивости среднеквадратичного уровня текущей амплитуды;
- величины σ_3 и σ_4 характеризуют среднеквадратичное отклонение магнитуды определяемой на сейсмической станции;
- величина σ_5 характеризует среднеквадратичные вариации периодов сейсмических сигналов;
- величина σ_6 учитывает дискретность выборки землетрясений для построения кривой $m_{0.5} = m_{0.5}(\Delta)$ по эпицентральному расстоянию.

В результате оценки σ_i формулы (1,2) трансформированы для расчета кривых обнаружения на каждой станции таким образом: сейсмическая станция «Климовская» -

$$P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0.5}}{0.368}\right); \text{ с/с «Пермогорье» - } P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0.5}}{0.371}\right); \text{ с/с «Архангельск» -}$$

$$P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0.5}}{0.372}\right); \text{ с/с «Тамица» - } P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0.5}}{0.407}\right).$$

Таким образом, расчеты функций $P = P(m, \Delta)$ и $m_{0.5}(\Delta, Az)$ позволили оценить магнитудную чувствительность четырех станций Архангельской сети и выявить её пространственное распределение при регистрации телесейсмических и региональных землетрясений мира для разных диапазонов эпицентральных расстояний и азимутов, и уточнить данные технических параметров регистрации этих станций.

Аналогичная работа для остальных станций сети, оснащенных аппаратурой с другими характеристиками, будет продолжена, что позволит сформировать компьютерную базу данных о характеристиках сейсмической сети, столь необходимую при разработке методики проведения сейсмомониторинга на территории Архангельского региона.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Уральского отделения РАН (грант молодых ученых и аспирантов за 2009 год.) и программы Президиума РАН № 16.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенович Г.И., Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Нерсесов И.Л., Николаев А.В., Ситников А.В., Трегуб Ф.С., Халтурин В.И. Отчет комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ АН СССР «Талгар», 1988. 98с.
2. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. О необходимости создания сети сейсмического мониторинга в северных регионах России // Екатеринбург: Журнал «Вестник УрО РАН», № 2 (16), 2006. С.25-35.
3. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность // «Землетрясения и микросейсмы в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы». Отв. ред. Маловичко А.А., Шаров Н. В., Шукин Ю.К. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 96 с.

УДК 550.34

**Оценка современной и палеонапряжений
геодинамического полигона западного Тянь-Шаня**
Л.А. Хамидов, К.Ф. Зиявитдинов, Ж.Ф. Фахриддинов
Ташкент, ул.Зулфияхоним, 3. e-mail: hamidov_l@mail.ru
Институт сейсмологии АН РУз., Узбекистан, 100128,

В настоящей работе используя методы математического моделирования, тектонофизический метод реконструкции напряжений и восстановлением истинных напряжений по механизмам землетрясений в первом приближении оценены как основные так и палеонапряжения для отдельных участков западного Тянь-Шаня (рис. 1). Сравнения проведены с результатами сеймотектонических исследований, с измеренными в горных выработках и разработках мест полезных ископаемых компонент напряжений и деформометрических инструментально - эмпирических исследований.

Для проведения механического анализа напряжений выбран участок Чаткальских гор и примыкающая к нему территория из западного Тянь-Шаня для которых нам удалось определить более менее обоснованные и точные данные о физико-механических свойствах горных пород, данные о современном движении, геофизических и др.параметры. К настоящему времени разработано много методов определения напряжений в земной коре, среди которых наиболее развитыми являются тектонофизический, сеймотектонический, фотоупругое моделирование, геолого-структурный метод, сейсмологический, математическое моделирование [3,4]. В данной работе для определения полей напряжений использованы следующие методы:

Тектонофизический способ. Реконструкция полей напряжений и определение палеонапряжений осуществляется тектонофизической съемкой. Измерением и определением уровней трещиноватости, углов падения и азимутов каждой площадки разрыва в каждом обнажении по простиранию или разломов восстанавливается уровень действовавших напряжений для каждого возраста пород, строятся локальные и генеральные карты направления главных напряжений и выделяются отдельно палео и современные напряжения [1,3]. Здесь же выделяются направления сжатия и растяжений (механизм) для каждого обнажения по возрастам пород, образование трещиноватости (определение основных тектонических фаз: каледонский, герценский, и т.д. до новейшего этапа).

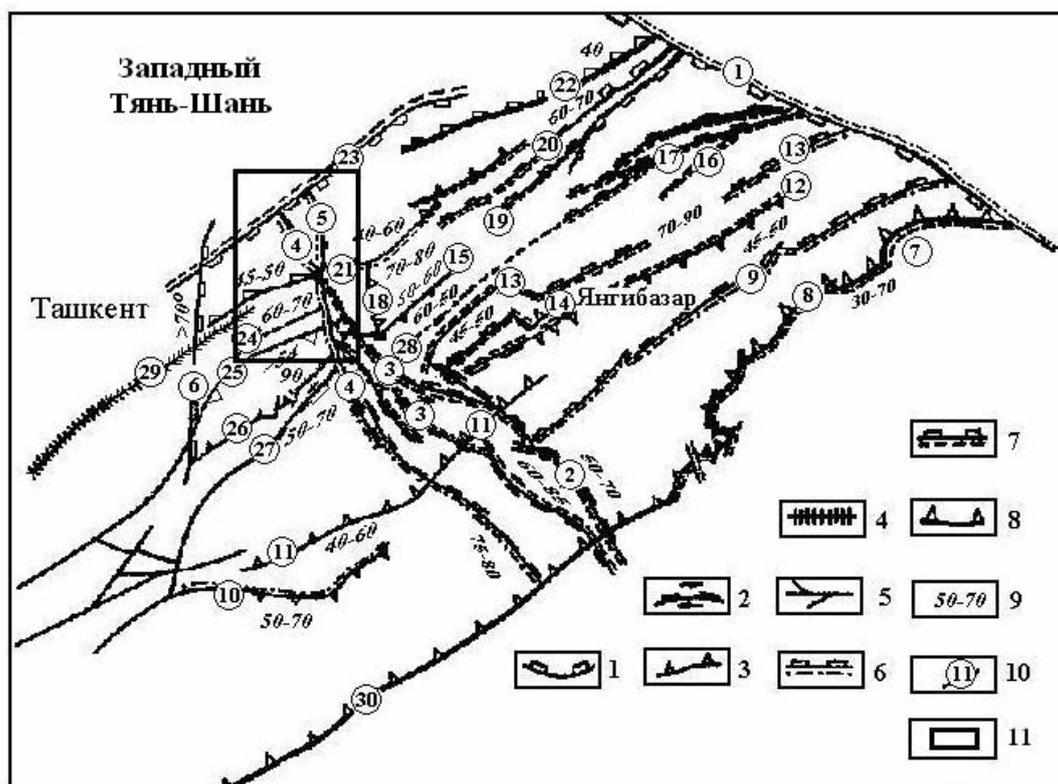


Рис .1. Морфология разрывных нарушений западного Тянь-Шаня (береговые штрихи в сторону падения поверхности смесителя [1,2]).

Условные обозначения: 1- взбросы или сбросы; 2- взброса (сброса) сдвиги; 3- надвиги; 4- флексурно-разрывные зоны; 5- разрывные нарушения, выявленные по геофизическим данным. Активизированные в новейшее время разрывные нарушения: 6-каледонские, 7- герценские, 8- альпийские, амплитуда перемещений по разломам за новейшее время, 9- смещения м.; горизонтальные-вертикальные; 10-номер разрывных нарушений соответствующие наименованиям: 1-Таласский; 2- Арашанский; 3- Кенкольский; 4- Кумбельский; 5- Угамский; 6- Меридиональный; 7- Западно-Карасуйский; 8- Чаткало-Атойнакский; 9- Ашуторский; 10-Шаугазский; 11- Актау Северо-Ангрениский; 12-Чаткальский; 13- Зилай Баркрак-Западно-Чаткальский; 14- Актерекский; 15- Кашкасуьский; 16- Сандалашский; 17- Таямыш-Кашкасуьский; 18- Пскем-Бурчмуллинский; 19- Тостартауский; 20- Пскемский; 21- Каржантауский; 22- Ойгангский; 23- Боганалинский; 24- Северо-Чирчикский; 25- Южно-Чирчикский; 26- Майгашган-Сюреньатинский; 27- Паркент-Нурекатинский; 28- Минтукумский; 29- Ташкентская флексурно-разрывная зона; 30- Северо-Ферганский.; 11- объект исследований.

Математическое моделирование. Численно-экспериментальное моделирование квазистатической задачи о концентрации напряжений в изотропной среде, в полупространстве с внутренними произвольно расположенными кусочными неоднородностями (включения, трещины и др.) в поле действующих упругих (сжимающих или сдвиговых) сил. Этот метод основан на математических моделях численно реализующих краевую задачу теории упругости [1,5]:

Рассмотрена (а) трещины сдвига, большой протяженности, на границе условия трения покоя Кулона, непрерывность смещений к нормали поверхности трещины, расположены под углом к поверхности полупространства, выбрано как аналог активного разлома или разломные зоны; (б) включения, большой протяженности жесткие или мягкие, на границе условия жесткого сцепления, расположены субвертикально, возможность варьирования модуля сдвига внутри включения, выбрано как аналог неактивных разломов и как кусочная неоднородность; (в) щели, средней протяженности, с большим участком контакта, не контактирующиеся участки имеют мягкий наполнитель, где модуль сдвига достаточно уменьшена. Жесткое упругое полупространство с напластованными сверху более мягкими плоско параллельными слоями, ослабленной несколькими цилиндрическими неоднородностями большой протяженности типа (а), (б) и (в), испытывает на всем

протяжении продольный сдвиг, а также сжатие на бесконечности задаваемых в виде однородной деформации.

Сейсмотектонический способ. Восстановление тектонических напряжений используя механизмы очагов землетрясений. Это известный метод сейсмотектоники, когда по объемным волнам регистрированным на стационарных станциях восстанавливаются, по выбранной методике, площадки разрыва при разрушении или развитии готового разрыва в очагах землетрясений, строив при этом линейный механизм образованных площадок, выделяя азимуты их падения и направлении сжатия-растяжения [6]. При большом количестве анализированных механизмов землетрясений по одной разломной зоне или прилегающим к нему участкам можно определить направление основных напряжений структуры в современном этапе.

При проверке точности расчетных данных принимались во внимание следующие признаки: интенсивность движения вдоль разломов в современную эпоху; уровень изменения значений максимального главного напряжения в узловых участках, определенное на основании механизма залегания гипоцентра [5], и других геологических условий включая усредненность физико-механических свойств; при этом предполагалось, что блоковое движение согласно [7] происходит в северном и в северо-западном направлениях.

В таблице показано сравнение расчетных значений напряжений с инструментальными и эмпирическими данными. На основании указанного определяется, что когда ориентация действующих напряжений в регионе получается под определенным углом к северу, тогда в большинстве случаев наблюдается совпадение измеренных данных с расчетными. Поэтому только ориентация движения в северо-западном направлении, как указано в [2,6] является недостаточной. Анализ тенденции показывает, что когда векторно суммируется ориентация регионального главного напряжения (которая направлено на северо-запад) по каждому обнажению, тогда можно получить более точные расчетные значения генерального направления.

Таблица

Сравнение расчетных значений напряжений и их направлений с инструментальными и эмпирическими данными.

№	Название разломов	Расчетные значения в МПа	Осреднение по разломам в МПа	Механизмы очагов по простиранию	Направление главных напряжений
1	Кумбельский	68	53	сброс-сдвиг: → С	северо-запад (СЗ)
2	Угамский	76	59	сброс-сдвиг: → СЗ	северо-запад (СЗ)
3	Чаткальский	106	87	надвиг: → ЮВ	юг (Ю)
4	Каржантауский	61	52	надвиг: → С	северо-запад (СЗ)
5	Пскемский	95	77	взбросы: → СЗ	северо-запад (СЗ)
6	Ташкентская ФРЗ	63	42	надвиг: → СЗ	север (С)

В данном случае получается, что ориентация главного напряжения, влияющего на исследуемый район, является север-северо-западным. Это так же подтверждается данными сейсмогеодинамических исследований [5] и данными геодинамических исследований [7]. Рассмотрим отличительные признаки поля напряжений геодинамического полигона западного Тянь-Шаня Восточного Узбекистана (рис.1). При анализе отличительных признаков поля напряжения в районе исследований принимались во внимание следующие три фактора: ориентация максимального главного напряжения; районы с различными значениями напряжения сдвига; распределение напряжений вблизи зоны слияния разломов;

а) Ориентация максимального главного напряжения. На рис.2 показана ориентация максимального главного напряжения в различных участках Восточного Узбекистана для случая, когда внешняя нагрузка действует согласно [1,5] в направлении северо-северо-запад.

На рис.2 стрелки показывают, что ориентация максимального главного напряжения в этом участке является север-северо-западным.

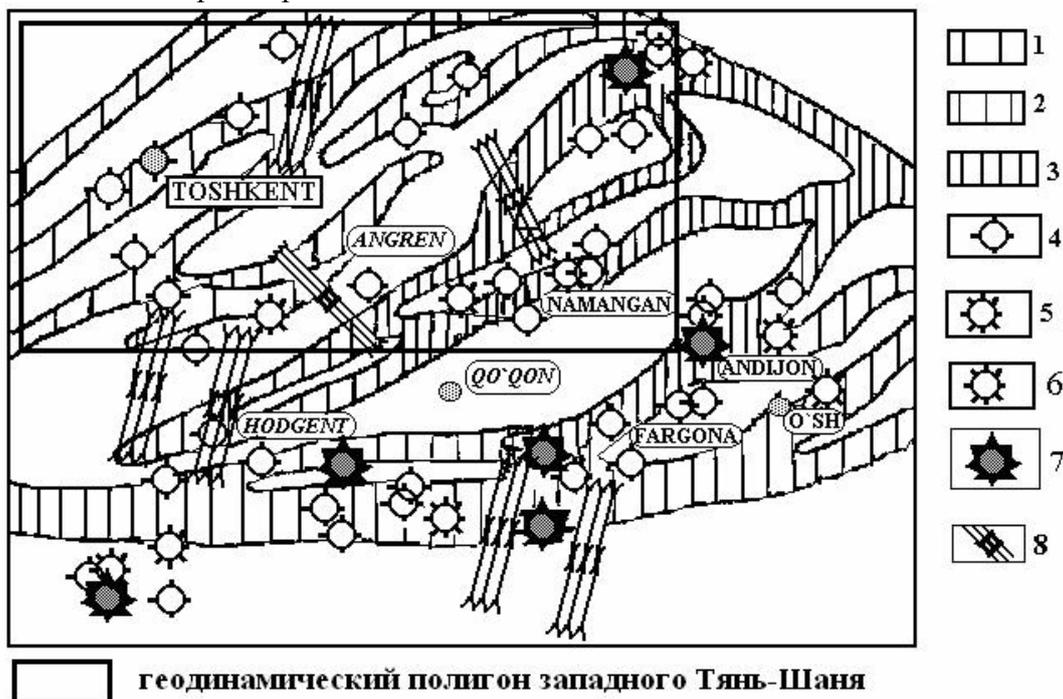


Рис.2. Схематическая карта преобладающие направления действующих сжимающих напряжений.

1,2,3 - Сейсмогенные зоны [8], в пределах которых могут возникать землетрясения с максимальной силой (1-7 баллов; 2-8 баллов; 3-9 баллов и более); 4,5,6,7 - эпицентры сильных землетрясений и их механизм [6], внутри кружков в которых: светлая - растяжение, темная сжатие (4 - $M=4,0-5,0$; 5 - $M=5,1-6,0$; 6 - $M=6,1-7,0$; 7 - $M=7,1-8,0$); 8,9,10-Преобладающие направления действующих сжимающих напряжений и их градиенты по глубине [5] согласно измерениям разных авторов (8-с нормальным гравитационным полем напряжений; 9-с градиентом горизонтальных напряжений $0,03 \text{ МПа} \leq \text{grad } \sigma \leq 0,07 \text{ МПа}$; 10 -с градиентом горизонтальных напряжений $0,07 \text{ МПа} \leq \text{grad } \sigma \leq 0,13 \text{ МПа}$).

Из рис.1 и рис.2 видно, что в обширных районах вне зоны разломов и, в частности, в больших участках к востоку от Кумбела и Каржантау доминирующая ориентация главного напряжения северо-западная. В зоне разломов, расположенных суб параллельно к Угамским и Пскомским, наблюдаются большие изменения ориентации главного напряжения (одновременно и их значений). В северо-западной зоне этих разломов ориентация максимального главного напряжения - от северо-восточного до север-северо-восточной; в юго-восточной зоне разломов - северо-западное направление; в почти восточно-западной зоне Каржантауского разлома почти северное направление. Это показывает, что зоны разломов вдоль северо-западного простирания характеризуются перемещением с левым сдвигом, а зоны разломов северо-восточного простирания - перемещением с правым сдвигом и сдвигово-сбросом. Это видимо объясняет причину, почему зоны разломов в почти горизонтальном направлении (как участок Каржантауского разлома пересекающих данную зону) подвергались сжатию и левостороннему сдвигу как определено и по механизмам землетрясений с $M>4,5$. Вблизи зоны слияния разломов наблюдается большие изменения ориентации и значений главного напряжения. Они аналогичны крестообразным концентраторам на кромках которых ввиду математической сингулярности оценка значений напряжений затруднена. Они отличаются большой амплитудой изменений расчетных параметров перемещений с нечетко выраженной закономерностью. Ориентации максимального касательного напряжения в зоне Каржантауского разлома и Западно-Чаткальской группы разломов почти северное, в районе к западу от Угамского разлома северо-западное и даже частично почти западное (рис.1;рис.2). Можно считать, что в этих районах преобладающей ориентацией главного напряжения является северо-западное.

Поэтому ориентация главных напряжений в различных местах района и ориентация главного напряжений, влияющего на регион, не всегда совпадает и наблюдаются случаи большой разницы. Это свидетельствует о том, что статистические данные о направлении главных напряжений в локальных участках одного района не могут быть совершенно аналогичными с ориентацией возбуждающей силы данного региона. Следует, однако, отметить, что раньше исследователи придерживались иной точки зрения ([2,4] и др.).

б) Районы с различными значениями напряжения сдвига. В данном случае среднее значение измеренного напряжения [1] сдвига составляет 10 МПа. Выбирали районы с большим и малым значением напряжения сдвига (см.рис.1,2). Напряжения сдвига испытывает влияние тектонической структуры в пределах от 3 МПа до 10 МПа. С другой стороны, участки со значением касательного напряжения более 4 МПа совпадают со сейсмически активными районами. Например, районы: Писком, Чаткал, Буручмулла где зарегистрированы очаги сильных землетрясений. Все эти локальные участки являются районами, где наблюдается концентрация напряжений сдвига в пределах прочности земной коры [3], а также сейсмически активными. Это подтверждает существование взаимосвязи между аномальностью изменения значений напряжений сдвига и сейсмической активности района.

в) Распределение напряжений вблизи зоны слияния разломов. Зоны слияние разломов представляет ту тектоническую структуру локализации касательных напряжений, в которой более часто встречаются очаги динамического сброса напряжений. Почти все очаги тектонических землетрясений приуроченных в ту или иную сейсмогенную зону Чаткал-Кураминской горной системы и зонах перехода к платформе, расположены по сейсмометрическим и геодинамическим оценкам в участках слияния разноранговых разрывов. В первую очередь следует указать, что величина средних значений напряжения сдвига вблизи зон слияния разломов с различной длиной и углом падения, является неодинаковой. Когда происходит изменение ориентации главных напряжений в регионе, тогда наблюдается неодинаковая тенденция изменения величины среднего значения касательных напряжений, а также их амплитуды изменения по разным направлениям слиющихся разрывов (см.рис.1 участки слияния разрывов). Среднее значение напряжения сдвига показывает частное, полученное делением на число дискретных значений суммы нескольких рассчитанных значений напряжения сдвига;

Таким образом можно установить, что когда ориентация главных напряжений в геодинамическом полигоне региона западного Тянь-Шаня северо-западное, тогда средние значения напряжения сдвига вблизи различных зон слияния разломов, как правило, получаются несколько завышенными, и в частности, это особенно отчетливо проявляется к юго-западу Угамского разлома и вблизи пересечения с Каржантауской флексурой; Увеличение числа сходящихся разломов для данного полигона не является признаком возрастания среднего значения напряжений сдвига, например, вблизи Кумбельского, Угамского разломов и Каржантауской флексуры (рис. 1) среднее значение напряжений сдвига в месте слияния трех групп разрывов составляет только 80% величины основных напряжений сдвига; При изменении ориентации внешней силы в одном и том же районе также наблюдается существенное изменение напряжений сдвига. Необходимо отметить, что в данном геодинамическом полигоне западного Тянь-Шаня за подледные 50 лет сброс напряжений реализовано пятью разрушительными сильными (с магнитудой $M \geq 4,5$) и более двух тысяча мелкими (с магнитудой $2,5 \leq M \leq 4$) землетрясениями [Буручмулла-1959г. ($M=5,8$), Ташкент-1966г. ($M=5,3$), Таваксай-1977г. ($M=5,0$), Назарбек-1980г. ($M=5,2$), Ташкент-2008г. ($M=4,8$)].

ЛИТЕРАТУРА

1. Хамидов Сейсмогеомеханические параметры палеосейсмодислокаций Чаткало-Кураминского региона.// Проблемы сейсмологии в Узбекистане – Ташкент: Янги авлод, №2, 2005. С.41-49.

2. Ходжаев А.К. Палеосейсмогеология Чаткало-Кураминского региона. - Ташкент, Фан:1985, 140с.
3. Белоусов Т.П., Куртасов С.Ф., Мухамедиев Ш.А. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли.-М.:ОИФЗ РАН, 1997, 324с.
4. Губин И.Е. Сейсмогенные тектонические процессы. - М.: Наука, 1987, 234с.
5. Бакиев М.Х., Хамидов Л.А., Ибрагимов А.Х. Концентрация напряжений вблизи локальных неоднородностей земной коры.//J.Intl. Earthq.,China.vol.15,№ 4, 2001, С.376-384.
6. Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана.-Ташкент: Фан, 1987, 143с.
7. Ярмухамедов А.Р., Быковцев А.С., Хамидов Л.А. и др. К исследованию трещинообразования в Центральных Кызылкумах.// Узбекский геологический журнал, № 1, 1987. С.19-29. 6-8 стр.
8. Ибрагимов Р.Н. Сейсмоструктура, сейсмогенные зоны и прогноз землетрясений на территории Узбекистана.// Проблемы сейсмологии в Узбекистане – Ташкент: Институт сейсмологии АН РУз, №5. 2008. С. 95-98.

УДК 550.36

Численные модели распределения температуры в оболочках Земли на этапе ее аккумуляции

¹Ю.В. Хачай, fax: 8343267 8832; E-mail: yu-khachay@yandex.ru,

²В.Н. Анфилогов, fax: 835135 70286, E-mail: anfilogov@mineralogy.ru

¹Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

²Институт минералогии УрО РАН, Миасс, Россия.

Геологическая эволюция Земли существенно зависит от ее начального состояния. Под начальным, для Земли понимают ее состояние к завершению активного этапа аккумуляции. Благодаря успехам внеатмосферных астрономических наблюдений за последние годы удалось выявить как планеты, так и протопланетные объекты на различных стадиях их эволюции у более 300 звезд. В результате, получено экспериментальное подтверждение существенных аспектов динамических моделей аккумуляции планет, развиваемых в [1-3]. Однако, до последнего времени не удавалось получить удовлетворительного объяснений ряду хорошо обоснованных фактов. В современной Земле основными структурами являются преимущественно силикатная мантия и практически железное по составу ядро. Результаты, полученные на основе анализа W-Hf изотопной системы, интерпретируются как свидетельство очень раннего, за время менее 10 млн. лет, разделения химических резервуаров ядра и мантии [4]. Тогда как на основе результатов по уран –свинцовой системе формирование этих структур продолжалось около 100 млн. лет.

В работе [5] нами предложена принципиально новая модель аккумуляции планет земной группы, которая использует современные результаты изотопных геохимических анализов, позволивших получить надежные оценки концентрации короткоживущих естественно радиоактивных изотопов и, прежде всего, ²⁶Al в веществе протопланетного облака. На основе этих данных получены принципиально новые оценки распределения температуры в растущих зародышах планеты в зоне “питания” Земли. К очень близким результатам независимо пришли и авторы работы [6]. Однако, опирающийся на эти результаты анализ возможного распределения начальной температуры в Земле до сих пор отсутствовал.

Для дальнейшей температурной эволюции Земли, как показало проведенное численное моделирование, существенную роль играет формирование распределение температуры в формирующемся ядре Земли. Именно этой проблеме здесь будет уделено основное внимание.

Согласно результатам, полученным нами в работе [5], уже на раннем этапе процесса аккумуляции выделения тепла короткоживущими естественно радиоактивными элементами и прежде всего ^{26}Al оказывается достаточно для того, чтобы в протопланетном зародыше превышающем размеры (50-100) км могла сформироваться расплавленная центральная область и сравнительно тонкая твердая верхняя оболочка. Скорости соударения тел на этом этапе еще малы, поэтому при соударении тел таких и близких размеров жидкие, преимущественно железные по составу части сливаются, но массы зародыша еще не достаточно для гравитационного удержания холодных, преимущественно силикатного состава обломков холодной твердой оболочки. На этом этапе они сохраняются в зоне питания протопланеты. Реализуется механизм дифференциации вещества в процессе аккумуляции планеты на резервуар будущего ядра и резервуар мантии. Важно, что процесс идет еще в малых телах и успевает завершиться за время менее 10 млн. лет. Тогда как последующее формирование структуры ядра и мантии продолжается, как и по всем имеющимся оценкам, около 100 млн. лет. Поскольку объединение жидких внутренних частей соударяющихся тел происходит в результате неупругого соударения, большая часть потенциальной гравитационной энергии через кинетическую энергию соударения преобразуется в тепло. Это продолжается до тех пор, пока ядро не достигнет большей части современной массы. На завершающей стадии роста ядра масса зародыша оказывается уже достаточной для того, чтобы удерживать все возрастающую долю силикатной оболочки выпадающих тел. И состав растущей области все более обогащается примесью силикатов. Процесс соударения аккумуляруемых тел от механизма полностью неупругого слияния с высокой степенью сохранения потенциальной энергии гравитационного взаимодействия и преобразования ее в тепловую, постепенно переходит в механизм твердотельного соударения, при котором только небольшая часть кинетической энергии преобразуется в поглощаемое зародышем планеты тепло.

При математическом моделировании излагаемого механизма следует учитывать, что в рассматриваемой модели процесс дифференциации вещества ядра в большей своей части проходит на стадии его роста. К завершению формирования этой структуры концентрация короткоживущих радиоактивных изотопов становится настолько малой, что вклад энергии их распада становится мал. Вопрос о вхождении долгоживущих радиоактивных изотопов в состав ядра остается открытым, но в большинстве рассматриваемых моделей их доля предполагается малой. Следовательно, температура в ядре на завершающей стадии его аккумуляции должна соответствовать современным значениям или быть вблизи этих значений.

Проведенное математическое моделирование термической эволюции растущей планеты опирается на изложенную выше схему процесса. Для скорости роста зародыша планеты используется модель Сафронова в варианте [1],

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 2(1 + 2\theta)r^2 \omega \left(1 - \frac{m}{M}\right) \sigma \quad (1)$$

где: ω - угловая скорость орбитального движения, σ - поверхностная плотность вещества в зоне «питания» планеты, M - современная масса планеты, r - радиус растущего зародыша, θ - статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания». Распределение температуры в теле увеличивающегося радиуса находится из численно решения краевой задачи для уравнения теплопроводности с учетом возможности появления расплава без явного выделения положения границы фронта кристаллизации и параметрического учета конвективного теплопереноса в расплаве по [7]:

$$c_{\text{эф}} \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{\text{эф}} \nabla T) + Q \quad (2)$$

где: $c_{\text{эф}}$, $\lambda_{\text{эф}}$ - эффективные значения теплоемкости, и теплопроводности, T - искомая температура в точке в момент времени t , Q - объемная мощность внутренних источников тепла. На поверхности растущего тела заданы условия, обеспечивающие баланс поступающей

части потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, затраты тепла на нагревание поступившего вещества и переизлучаемый в пространство тепловой поток с учетом прозрачности внешней среды:

$$k \rho \frac{GM}{r} \frac{dr}{dt} = \varepsilon \sigma [T^4 - T_1^4] + \rho c_p [T - T_1] \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

где: ρ - плотность вещества, G – гравитационная постоянная, M – масса растущей планеты r – ее радиус. T и T_1 – соответственно, температура тела на границе и внешней среды, ε - коэффициент прозрачности среды, c_p – удельная теплоемкость, k – доля преобразованной в тепло потенциальной энергии. Скорость изменения радиуса определяется из (1).

На рис.1 представлены некоторые варианты возможные варианты распределения температуры к моменту времени, когда размер протопланеты достиг 3500км. Основное отличие полученных распределений от полученных до сих пор состоит в наличии минимума на значениях $r = (400-500)$ км. К этому времени значительно снизилось содержание короткоживущего ^{26}Al . Затем, по мере увеличения массы протопланеты увеличивается роль выделения кинетической энергии при падении аккумулируемых тел и частиц.

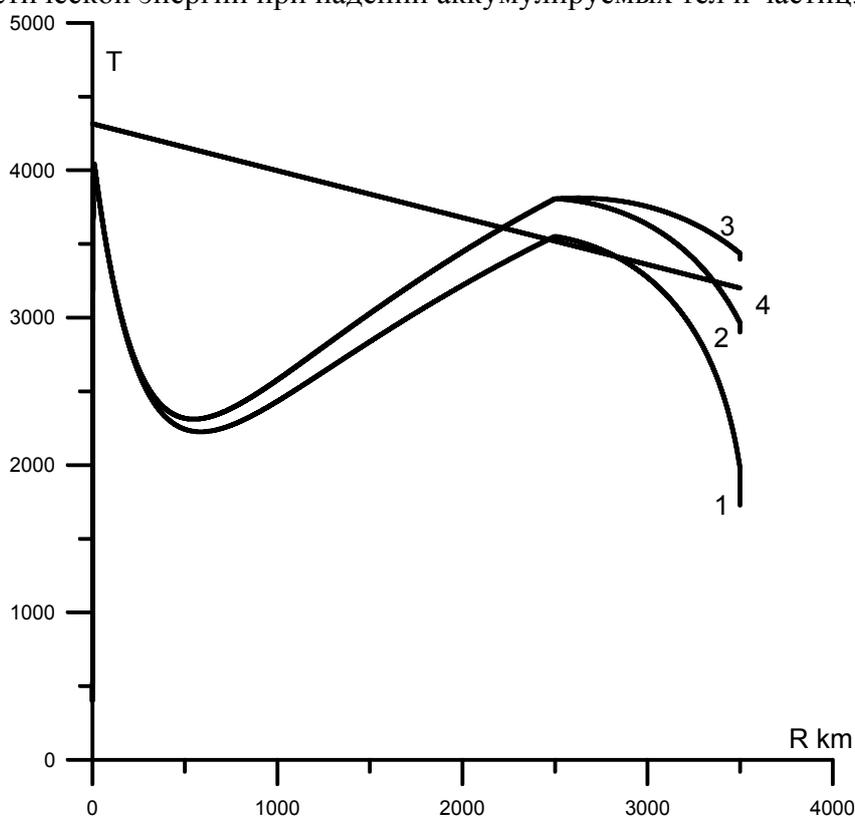


Рис.1. Варианты распределения тепла в области формирующегося ядра Земли.

1 – в железном протоядре $k= 0.3$, в силикатной мантии $k = 0.01$, в интервале глубин (2500-3500)км изменяется линейно; 2 -- в железном протоядре $k= 0.4$, в силикатной мантии $k = 0.02$; 3-- в железном протоядре $k= 0.4$, в силикатной мантии $k = 0.03$; 4 – зависимость температуры плавления от давления в современном ядре по [8].

На завершающем этапе аккумуляции ядра учитывается снижение доли преобразуемой в тепло энергии, обусловленное увеличением доли силикатной составляющей соударяющихся тел, что приводит к значительному уменьшению температуры формируемых слоев.

Заключение

Для предложенного нами ранее механизма неоднородной аккумуляции выполнено моделирование эволюции температуры в растущей планете. Показано, что до размеров «зародыша» около 400 км распад короткоживущих радиоактивных элементов является определяющим источником внутренней энергии. Затем основным источником становится часть потенциальной гравитационной энергии, превращающаяся в тепло в процессе удара падающих тел. Это поглощение более эффективно при объединении расплавленных

железных частей протопланетных тел. Учет этого обстоятельства позволил выделить модели, в которых большая часть области современного железного внешнего ядра оказывается расплавленной к окончанию аккумуляции планеты. Снимается проблема раннего наличия геомагнитного поля. Обосновать преимущества вариантов эволюции с проплавлением силикатной мантии или с холодной мантией возможно только с привлечением изотопных геохимических результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-05-00983.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 6, с. 5-24.
2. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука. 1990.-296 с.
3. Хачай Ю.В. Численное моделирование распределения начальной температуры в Земле. В сб.: Ядерно-геофизические и геотермические исследования. Свердловск. УНЦ АН СССР, 1987. с. 38- 44.
4. Jacobsen S., Yin Q. Models of planetary accretion and core formation based on the Hf-W clock.// Geophys. Research Abstracts.2003. v.5, 13884.
5. Анфилогов В.Н., Хачай Ю.В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. 2005, т 403, № 6, с. 803-806.
6. Печерникова Г.В., Витязев А.В. в кН.: Катастрофические воздействия космических тел М.: Академнига.2005.p.251-265
7. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д., Журнал вычислительной математики и математической физики .1965. т.5, №5.
8. Стейси Ф.Д. Физика Земли. М.: Мир. 1972.- 342 с.

УДК 382.3

Вопросы теории сейсмоакустического скважинного мониторинга активных сред (на примере нефтяных залежей)

О.А. Хачай, Г.В. Иголкина, В.В. Дрягин

Тел. 343 2679560, факс 343 2678872, olga.hachay@r66.ru

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Под активной средой будем понимать среду, реагирующую на внешнее воздействие. К таким средам относятся все месторождения полезных ископаемых, находящихся в процессе отработки, в том числе и нефтяные залежи [1]. Установлен эмпирический факт о влиянии вибрационного воздействия на ускорение процессов извлечения нефти. Физическое объяснение этому может быть следующая модель: активная среда имеет свою высокую энергию и часто неравновесное структурное состояние. Поэтому от воздействующего сигнала следует ожидать синхронизирующего или синергетического действия на мезопроцессы в зонах максимальной нестабильности, пониженной прочности и высокой усталости среды на мезоуровне. На этих уровнях энергия воздействия может накапливаться в мезоструктурах и вызывать механические эффекты, инициирующие механические движения и фрагментацию среды.

В случае нефтяного пласта, находящегося в процессе отработки значительная часть внутренней энергии порождена высоким давлением вытесняющей жидкости, что является источником механической деструкции залежи и является целью воздействия на залежь. Еще более существенная часть внутренней энергии среды содержится в виде потенциальной энергии деформации блоков коллектора и окружающих горных пород, вызванной нарушением равновесия геомеханической системы за счет добычи нефти, что ведет к медленной неупругой деформации среды, направленной к переходу к новому равновесному

состоянию. Этот процесс имеет, в основном сдвиговый характер и сопровождается повышением уровня сейсмоакустической эмиссии и появлению “доминантных частот” вторичного излучения в нефтепродуктивных пластах, что означает, что часть механической энергии релаксационного движения среды высвобождается в виде эндогенного излучения и указывает на активизацию процессов трещинообразования.

Для теоретического обоснования сейсмоакустического мониторинга состояния пласта до и после сейсмического на него воздействия важно рассмотреть модели эффективных механизмов диссипации внутренней энергии залежи и структурной энергии среды в процессах перехода ее в кинетическую энергию движения блоков и вытеснения нефти. Например, автоколебания, резонансы, разрушение перенапряженных и испытывающих усталостные явления элементов среды.

Известно, что в идеально упругой среде, т.е. при отсутствии границ с разрывами на них смещений или напряжений энергия не может накапливаться во времени и сохраняться после выключения источника, поэтому непрерывная среда не может соответствовать наблюдаемым явлениям становления и релаксации сейсмической эмиссии с присутствием собственных частот среды. В блочных же структурах, как показал академик М.А.Садовский, а также в иерархически блочной среде возможно формирование вторичных излучений сейсмических волн с доминантными “собственными частотами” и после длительного воздействия на такую среду ослабевают межблочные контактные зоны и усиливается динамическая фрагментация.

Рассмотрим следующий экспериментально наблюдаемый факт-повышение нефтеотдачи под влиянием динамической реструктуризации блочной энергонасыщенной нефтяной залежи. При длительной эксплуатации месторождения скелетная основа нефтяного пласта постепенно разрушается, что приводит к значительному росту внутренних напряжений и ослаблению связей между составляющими пласт отдельными блоками. При этом даже небольшой импульс может привести к перестройке структуры пласта, усилить подвижность нефти и увеличить ее долю в скважинной жидкости [2].

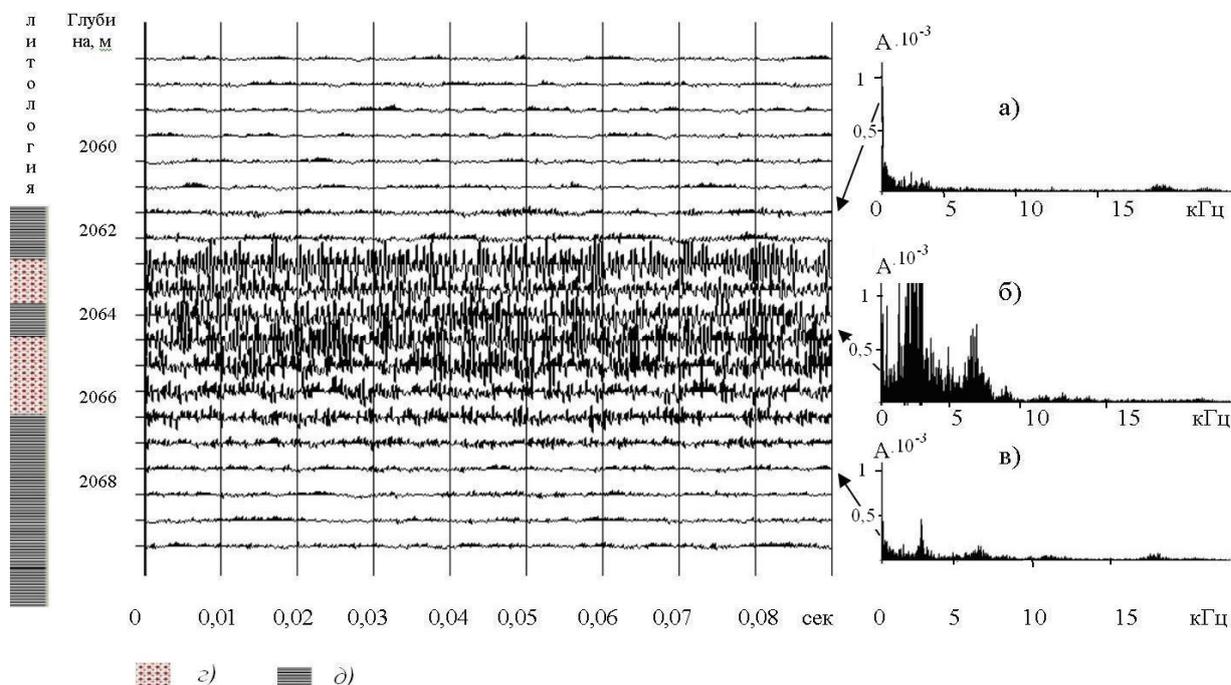


Рис. 1. Поле сейсмоакустической эмиссии в нефтяном пласте после акустического воздействия: а) спектр сигнала САЭ в кровле пласта- коллектора , б) внутри пласта, в) в подошве пласта, г) нефтяной пласт – коллектора, д) вмещающие породы –не коллекторы.

Для описания этого эффекта необходимо рассмотреть волновой процесс в иерархически блоковой среде и теоретически промоделировать механизм возникновения автоколебаний под действием релаксационных сдвиговых напряжений.

По данным спектрального анализа сейсмоакустической эмиссии следует, что нефтяной пласт после вибрационного воздействия начинает колебаться на частотах более высоких, нежели это следует из оценки для стратификационных резонансов: $f_h = V / 4h$ [3]. Наличие нескольких частот пласта и их количественные значения свидетельствуют о фрагментированности и квантованности пласта. Эти частоты также получили название доминантных [4].

Отмечен более длительный период релаксации и большая интенсивность высокочастотного сейсмического излучения горных пород нефтепродуктивного пласта по сравнению с его низкочастотной составляющей, что является отражением геодинамических процессов разного масштабного уровня, так, например, частота 10 кГц по данным лабораторных исследований [5] соответствует доминирующей частоте акустического шума при разрушении глин.

Экспериментальные и теоретические исследования механизмов вибрационной стимуляции нефтеотдачи обводненных месторождений с использованием вибровоздействия приводят к выводу о развитии резонансных колебаний в трещиновато-блочных пластах. Эти колебания, вызванные слабыми, но длительными и стабильными по частоте воздействиями, создают условия для генерации в пластах ультразвуковых волн, которые способны разрушать загустевшие нефтяные пленки в трещинах коллекторов.

Измерение высокочастотных сейсмоакустических полей в скважинах вблизи областей концентрации напряжений в массивах горных пород, а также в трещиновато-пористых флюидонасыщенных слоях при низкочастотных вибровоздействиях указывает на возникновение ультразвуковых колебаний в сотни и тысячи герц. В кристаллических массивах существование этих полей связано с процессом образования новых трещин, в флюидонасыщенных средах, наряду с упругими могут возникать и гидродинамические причины. Для трещиновато-пористых коллекторов, находящихся в процессе эксплуатации методом высоконапорного вытеснения нефти водой возможность интенсификации ультразвуковых колебаний может иметь важное технологическое значение. Даже очень слабый ультразвук способен разрушать за длительное время действия вязкие нефтяные пленки, образующиеся в трещинах между блоками, что может быть причиной понижения проницаемости пластов и уменьшения нефтеотдачи [6].

Рассмотрим три последовательно возникающих процесса, приводящих к усилению ультразвуковых полей при вибрационном воздействии на слой.

1-ый: передача слабых гармонических колебаний сводового слоя над коллектором к блокам коллектора.

2-ой: возникновение микроколебаний блоков в потоке флюидов при высоком давлении, что приводит к пульсациям давления в жидкости и к неравномерности течения в трещинах.

3-ий: образование резонансных упругих колебаний блоков, вызывающих излучение ультразвуковых колебаний.

Механизм передачи колебаний первичной низкочастотной продольной волны, заключается в том, что они возбуждают коллекторный слой как целое.

Передача поперечных колебаний при наклонном падении волны на слой зависит от способности материала, заполняющего трещины между блоками к передаче сдвиговых напряжений. Так, если этот материал вода, то поперечные колебания не пройдут из сводового слоя в нефтяной пласт. Если материал в трещине вязкий, то сдвиговые колебания будут воздействовать на примыкающие блоки и вызывать микроскопические горизонтальные смещения и повороты.

Рассмотрим задачу дифракции звука на двумерной упругой неоднородности с иерархической структурой, расположенной в j -ом слое n -слоистой среды [7]. Если при переходе на следующий иерархический уровень ось двухмерности не меняется, а меняются

только геометрии сечений вложенных структур, то аналогично (1) можно выписать итерационный процесс моделирования сейсмического поля (случай формирования только продольной волны). Итерационный процесс относится к моделированию отклика перехода с предыдущего иерархического уровня на последующий уровень. Внутри каждого иерархического уровня интегро-дифференциальное уравнение и интегро-дифференциальное представление вычисляются с помощью алгоритмов, аналогично описанным в [8].

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{Cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{jil}} \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma_{jil} 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) \quad \text{при } M^0 \in S_{Cl} \\ & \frac{\sigma_{jil}(k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{Cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) \quad \text{при } M^0 \notin S_C \end{aligned} \quad (1)$$

$G_{Sj}(M, M^0)$ - функция источника сейсмического поля рассматриваемой задачи, $k_{1jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil} / \lambda_{jil})$; - индекс ji обозначает принадлежность свойств среды внутри неоднородности, ja - вне неоднородности, индекс $l = 1, \dots, L$ - номер иерархического уровня, λ - постоянная Ламэ, σ - плотность среды, ω - круговая частота, $\vec{u}_i = grad \varphi_i$; $i = 1, \dots, j, ji, \dots, n$. Если на некотором иерархическом уровне структура локальной неоднородности распадается на несколько неоднородностей, то двойной и поверхностные интегралы в выражениях (2) берутся по всем неоднородностям. В данном алгоритме рассмотрен случай, когда физические свойства неоднородностей одного и того же уровня одинаковы, различаются только границы областей.

Аналогично выписывается такой же процесс для моделирования распространения упругой поперечной волны в n -слойной среде с двумерной иерархической структурой произвольной морфологии.

$$\begin{aligned} & \frac{(k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{Cl}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\mu_{ja}}{\mu_{jil}} u_{x(l-1)}^0(M^0) + \\ & + \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jil})}{\mu_{jil} 2\pi} \oint_{Cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0) \quad \text{при } M^0 \in S_{Cl} \\ & \frac{\mu_{jil}(k_{2jil}^2 - k_{2j}^2)}{\mu(M^0) 2\pi} \iint_{S_{Cl}} u_{xl}(M) G_{Ss,j}(M, M^0) d\tau_M + u_{x(l-1)}^0(M^0) + \\ & + \frac{(\mu_{ja} - \mu_{jil})}{\mu(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} u_{xl}(M) \frac{\partial G_{Ss,j}}{\partial n} dc = u_{xl}(M^0) \quad \text{при } M^0 \notin S_{Cl} \end{aligned} \quad (2)$$

$G_{Ss,j}(M, M^0)$ - функция источника сейсмического поля рассматриваемой задачи, $k_{2jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil} / \mu_{jil})$; μ - постоянная Ламэ.

Выписанный алгоритм моделирования распространения двух типов сейсмических волн в массиве скелета нефтяной залежи и в межблоковом пространстве нефтяной залежи может быть использован как аппроксимационный для интерпретации данных скважинного сейсмоакустического мониторинга, сформулировать требования к системе мониторинговых наблюдений для организации управляемого воздействия на нефтяной пласт.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований по Отделению наук о Земле РАН-1 на 2009 - 2011 гг. «Фундаментальные проблемы геологии, седиментологии, геохимии нефти и газа, разработка новых технологий прогноза, поиска, разведки и разработки традиционных и нетрадиционных месторождений углеводородов. Прогноз развития сырьевой базы нефтегазового и нефтехимического комплексов нефтегазового комплексов России до 2030г. и на перспективу до 2050 г.»

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород(обзор)// Акустический журнал, 2005, Том 51, Приложение, с.6-18.
2. Митрофанов В.П. Дзюбенко А.И. Нечаева Н.Ю. Дрягин В.В. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта// Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1998. №10.
3. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра.1996.
4. Дрягин В.В. Кузнецов О.Л. Стародубцев А.А. Рок В.Е. Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии. Акустический журнал, 2005, Том 51. Выпуск «Геоакустика» с. 66-73
5. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М.: Недра.1984.
6. Алексеев А.С., Цецохо В.А., Белоносков А.В., Сказка В.В.// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001, №6, с.3-12.
7. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Моделирование сейсмического и электромагнитного поля в иерархически неоднородных средах.//Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов. Материалы Междун.конференции.г.Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2008,с.295-299.
8. Хачай О.А. Математическое моделирование и интерпретация переменного электромагнитного поля неоднородной коры и мантии Земли.// Диссертация на соискание степени доктора физ.-мат. наук. Екатеринбург. 1994.с.314.

УДК 550.8

Обнаружение краткосрочных предвестников сильных динамических явлений по данным электромагнитного индукционного мониторинга в удароопасных массивах различного вещественного состава

О.А. Хачай¹, О.Ю. Хачай²

тел.+7 343 2679560, факс +7 343 2678872, E-mail:olga.hachay@r66.ru

1- Институт геофизики УрО РАН, 2-Уральский Государственный Университет, Екатеринбург, Россия.

При ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород проявляется техногенная сейсмичность, вопросам прогноза и профилактики которой уделяется много внимания во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью. Важная роль здесь принадлежит краткосрочному прогнозу, методика выделения критериев для него все еще является проблемой как в горном деле, так и в сейсмологии [1]. С точки зрения парадигмы физической мезомеханики, включающей в себя синергетический подход к изменению состояния массивов горных пород различного вещественного состава, эту проблему можно решить с помощью методов мониторинга, настроенных на изучение иерархических структурных сред [2-3]. Изменения в среде, приводящие к краткосрочным предвестникам динамических явлений объясняются в рамках концепции самоорганизованной критичности [4-5], для которой узловыми моментами являются неоднородность и нелинейность [библ.[2]].

В рамках школы ИГД СО РАН развивается новое направление изучения состояния массива горных пород, называемое нелинейной геомеханикой [6]. Однако нам представляется, что большего успеха можно достичь в комплексе с геофизическими

исследованиями, методики проведения которых опираются на модель среды с иерархической структурой. Если же нас интересует дополнительно эволюция этой структуры, то необходимо использовать комплексные геофизические методики, обладающие разрешающей способностью выявления зарождения и распада самоорганизующихся структур [3].

Впервые именно при использовании разработанной в ИГФ УрО РАН попланшетной электромагнитной методики удалось в рамках натуральных исследований реализовать идею выявления зон дезинтеграции в массиве горных пород и организовать мониторинг их морфологии [7-8]. Используемая методика относится к геофизическим методикам неразрушающего контроля. Она отличается от известных ранее методик просвечивания или томографии системами наблюдения и последующим методом интерпретации, основанной на концепции трехэтапной интерпретации [9-10].

В работе [11] описаны первые натурные результаты по обнаружению явления самоорганизации в массиве горных пород при техногенном воздействии и способу разработки критериев устойчивости на основе предложенной методики классификации. Эти результаты получены на основе анализа нескольких циклов электромагнитного мониторинга массива удароопасного Таштагольского подземного рудника, проведенных в 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 гг. в ряде выработок, расположенных на четырех горизонтах на глубинах от 540 до 750 м, с целью выявления морфологии зон дезинтеграции в околорудничном пространстве в массиве горных пород, находящемся под интенсивным техногенным воздействием и влиянием естественного поля напряжений.

В работе [12] проведены исследования нацеленные на разработку критериев пространственно-временного комплексного активного и пассивного сейсмического и электромагнитного мониторинга для предотвращения разрушительных динамических явлений на основе шестилетних данных сейсмологического мониторинга, проводимого службой горных ударов на Таштагольском подземном руднике и полученного опыта использования разработанной в ИГФ УрО РАН системы индукционного электромагнитного пространственно-временного мониторинга на массивах различного вещественного состава до и после массовых взрывов.

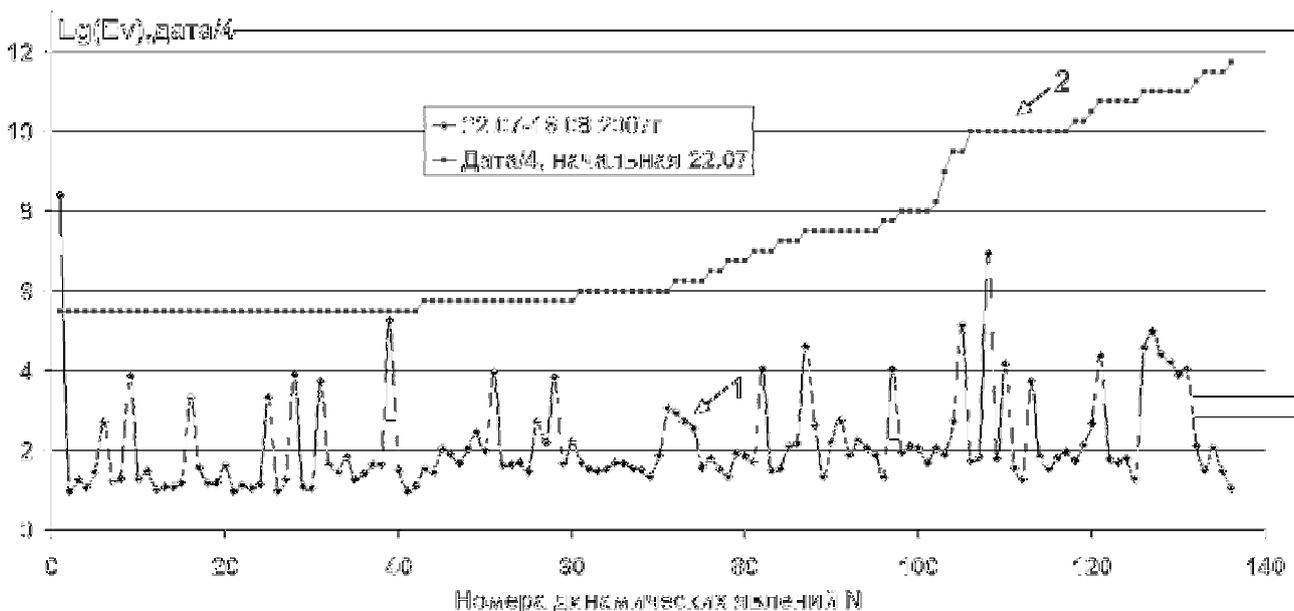


Рис.1. Распределение по энергиям динамических явлений в массиве Таштагольского рудника после массового взрыва (N=1). (Данные из сейсмологического каталога Таштагольского рудника, авторы Климов В.К., Шипеев О.В.).

Настоящая работа посвящена анализу морфологии структурных особенностей зон дезинтеграций перед сильным динамическим явлением. При проведении очередного цикла электромагнитных наблюдений на Таштагольском руднике в августе 2007г. 9 августа произошел горный удар с энергией $\lg E=6.9$ в целике, расположенном в створе орта 3 на уровне 16м ниже почвы горизонта -280 (рис.1, N=108).

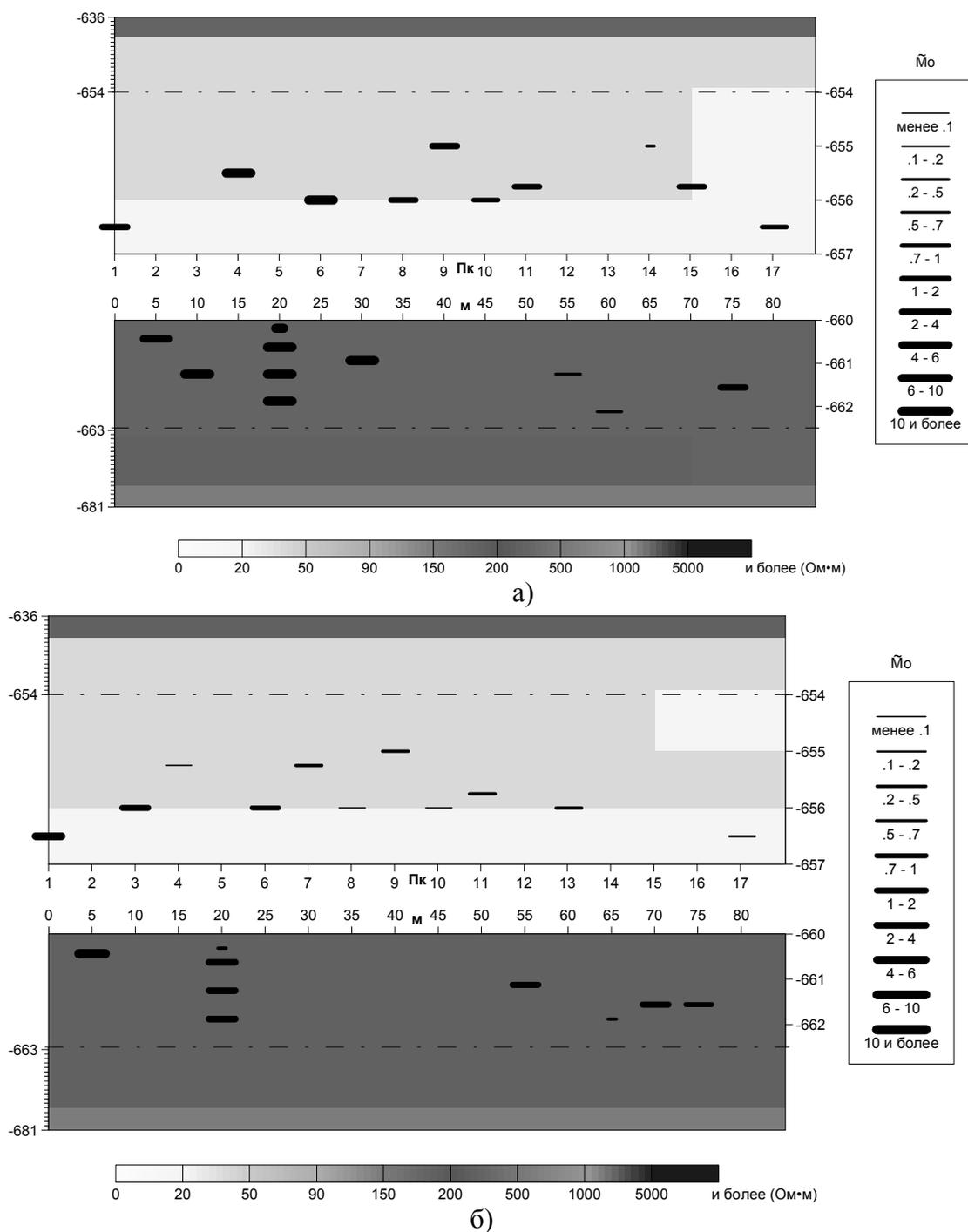


Рис.2 Геоэлектрический разрез по профилю орта 4, гор.-210, Северо-западный участок (рис.2) а) наблюдения проведены 9 августа, б) - 8 августа 2007г., частота 10.15 кГц, по вертикальной оси отложена глубина в м.

Анализ второй кривой (рис.1) демонстрирует неравномерность количества слабых динамических явлений в массиве всего шахтного поля с энергией $\lg(E_v) < 6$ во времени. Так, после массового взрыва в эти же сутки было зарегистрировано 42 явления, на следующие сутки – уже 17, далее это количество в следующие сутки еще более уменьшается. Перед

горным ударом наблюдается существенное разрежение количества динамических явлений - зона затишья. В течение суток, когда произошел горный удар после него наблюдалось 12 слабых динамических явлений, аналогично тому, как это происходило на третьи сутки после массового взрыва.

За трое суток до горного удара в ортах 3,4 (рис.2а-б,3) в геоэлектрических разрезах почвы обнаруживаются субвертикальные дискретные структуры, в которые объединились зоны дезинтеграции. Эти структуры проявились в резонансном режиме на разных частотах и только на одной частоте для каждого из ортов. Это же явление мы обнаруживали ранее за одни сутки на шахте Естюнинская и СУБРе шахта 15 [13]. Появление структур субвертикальной морфологии - предвестник сильного динамического явления, однако для определения места и магнитуды события необходимо иметь информацию о состоянии массивов ортов и принадлежности к соответствующим рангам об устойчивости массива, как это было сделано в работе [14].

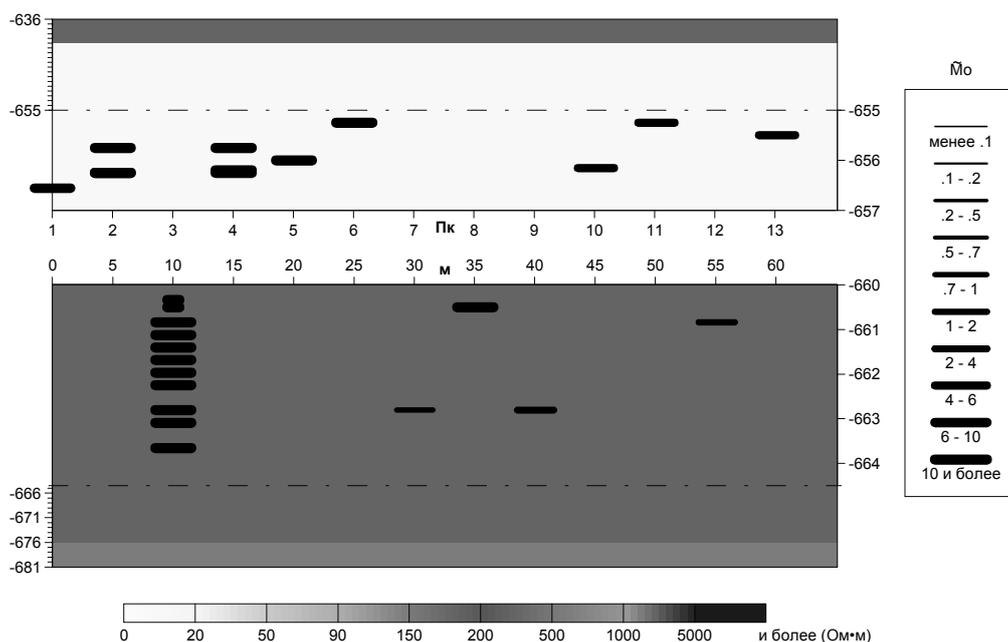


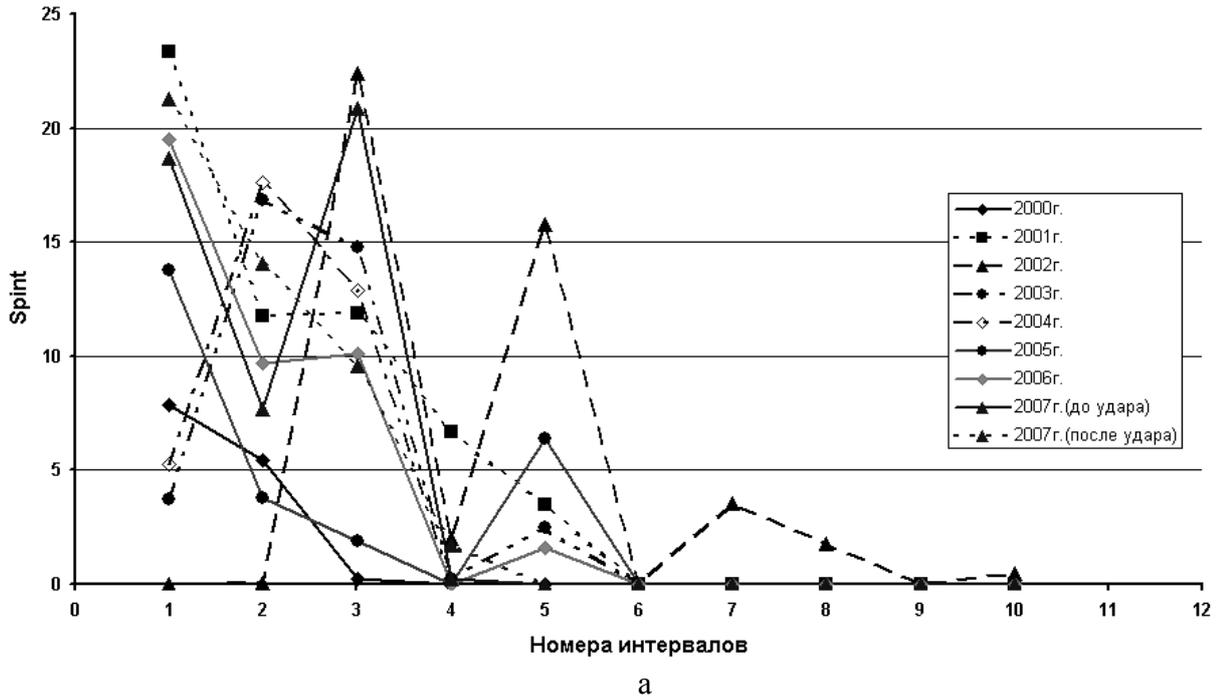
Рис.3. Геоэлектрический разрез по профилю орт3, гор.-210, Северо-западный участок, наблюдения проведены 7 августа 2007г., частота 5.08 кГц.

На рис.4 (а,б)приведено сравнительное с 2000 по 2007г. распределение параметра поинтервальной интенсивности (в 2007г. приведены результаты по данным электромагнитных измерений до и после горного удара) в почве массива орта 2, горизонта - 210 на двух частотах: 5.08 и 20 кГц.

По классификации [14] состояние массива было определено как квазиустойчивое. Полученные результаты показывают, что несмотря на очень близкое расположение этого орта к месту, где произошел горный удар, массив практически остался в состоянии, описываемой градацией квазиустойчивый. За промежуток времени со 2 августа по 13 августа 2007г. максимум параметра Spint переместился с 4-го интервала (3м-4м) на первый (0-1м) без увеличения его амплитуды.

Таким образом введение в систему обработки предлагаемого комплексного пассивного и активного геофизического мониторинга, нацеленного на изучение переходных процессов перераспределения напряженно-деформированного и фазового состояний может способствовать предотвращению катастрофических динамических проявлений при отработке глубокозалегающих месторождений. Методы активного геофизического мониторинга должны быть настроены на модель иерархической неоднородной среды.

Горизонт -210, орт 2, частота 5 кГц



Горизонт -210, орт 2, частота 20 кГц

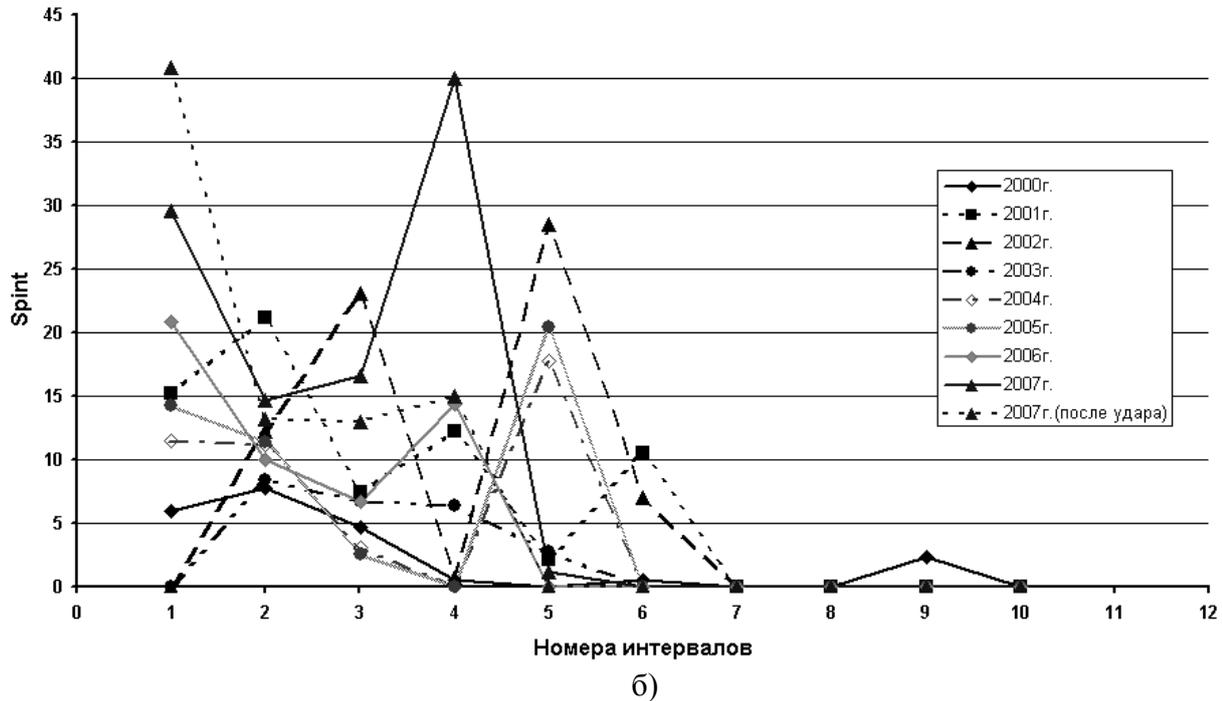


Рис.4 Распределение параметра поинтервальной интенсивности Spint [14] за 8 циклов наблюдения в массиве 2-го орта, горизонта -210, Таштагольский рудник по данным электромагнитного индукционного мониторинга.

а) наблюдения 2 августа 2007г., частота 5 кГц ,б) 13 августа 2007г., частота 20 кГц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-00149-а

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егоров П.В., Редькин* Мониторинг горных ударов при разработке рудных залежей с блочной структурой.// Международная конференция "Геодинамика и напряженное состояние недр Земли". Новосибирск СО РАН, 2-4 октября 2001. с.309-314.
2. *Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов.* Т.1, Новосибирск Наука, СО РАН, 1995, 297с.
3. *Хачай О.А.* Геофизический мониторинг состояния массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики// Физика Земли, 2007, №4, с.58-64.
4. *Олемской А.И., Кацнельсон А.А.* Синергетика конденсированной среды. Москва, УРСС, 2003, с.335.
5. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем. Москва, "Янус-К", 2002, с. 282.
6. *Курленя М.В., Опарин В.Н.* Современные проблемы нелинейной геомеханики. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск, 1999г. С.5-20.
7. *Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю.* Новая методика обнаружения зон дезинтеграции в околорудном пространстве массивов горных пород различного вещественного состава. // Горный информационный аналитический бюллетень. 2003, №11, с.26-29.
8. *Хачай О.А.* К вопросу об изучении строения, состояния геологической гетерогенной среды и их динамики в рамках дискретной и иерархической модели. //Геомеханика в горном деле. Екатеринбург. ИГД УрО РАН, 2003. с. 30-38.
9. *Хачай О.А.* К вопросу об изучении строения и состояния геологической гетерогенной нестационарной среды в рамках дискретной иерархической модели // Российский геофизический журнал, 2004, № 33-34, С.32-37.
10. *Хачай О.А., Влох Н.П., Новгородова Е.Н., Хачай А.Ю., Худяков С.В.* Трехмерный электромагнитный мониторинг состояния массива горных пород // Физика Земли, 2001, №2, с.85-92.
11. *Хачай О.А.* Явления самоорганизации в массиве горных пород при техногенном воздействии. // Физическая мезомеханика 7, Спец.выпуск, Ч.2., 2004, С.292-295.
12. *Хачай О.А.* Проблема изучения переходного процесса перераспределения напряженного и фазового состояний массива между сильными техногенными воздействиями.//Горный информационно-аналитический бюллетень 2006, №5, с.109-115.
13. *Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю., Кононов А.В., Наседкин В.Г.* Результаты геофизических и геологических исследований на шахте Естюнинская. // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Четвертые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича, 02-06 июля 2007 г. Екатеринбург 2007. с. 197-199.
14. *Хачай О.А.* Исследование развития неустойчивости в массиве горных пород с использованием метода активного электромагнитного мониторинга. //Физика Земли. 2007, №4, с.65-70.

УДК 591.5

Геоэкологическое состояние Самаровского останца

*Ч.В. Хонинов, М.Я. Кузина chingiz_geo@mail.ru, m_kuzina06@yahoo.com
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия*

За последние 7 лет г. Ханты-Мансийск испытал бурное развитие в строительном комплексе: постройка жилых, промышленных и муниципальных сооружений, а также прокладка новых автодорог. Это говорит о том, что происходит социальный и экономический подъем в обществе и развитие города в целом. Но надо отметить, что быстрые темпы роста в строительстве также оказывают непосредственное влияние на окружающую среду и динамику её развития.

Самаровский останец расположен в центральной части Западно-Сибирской равнины, вблизи устья р. Иртыш, в черте г. Ханты-Мансийска (рис.1). Он является уникальным природным объектом по ряду причин:

- 1) в пределах его территории сохранился естественный уголок северной тайги с уникальными ландшафтно-климатическими условиями;
- 2) это опорный геологический разрез, по которому эпоха максимального оледенения Западной Сибири получила название «самаровская»;
- 3) вызывает большой интерес геологическое происхождение останца.



Рис.1. Положение Самаровского останца на космоснимке г. Ханты-Мансийска.

Большое влияние на геоэкологическое состояние района оказывают подземные воды. С разгрузкой подземных вод на рассматриваемой территории связано проявление экзогенных геологических процессов – оплывин, оползней, плывунов, эрозии ручьев и временных водотоков, суффозии, солифлюкции, заболачивания, наледи. Наибольший урон лесным растениям наносят эрозия, оползни и оплывины. Последние связаны с очаговой разгрузкой подземных вод. Доцент ИГНиГ Захарченко А.В. в рамках своих экологических исследований прошел маршруты по ручьям и протокам останца, в одном из которых (руч. Рыбный) были обнаружены крупные оплывинные и оползневые явления. Типичные размеры оплывин от 8-15 м в длину до 2-4 м в ширину, глубина захвата грунтов ниже почвенного слоя 20-30 см. В обнажении видны влажные суглинки, супеси, серые глины, по которым протекают очень тонкие струи воды. Здесь же встречаются и небольшие оползни. Оползни классические, циркообразные, небольшие по размерам – ширина по фронту до 20 м, чаще всего 10-12 м, амплитуда срыва грунтов – 1-2 м. На месте образования оползней и крупных оплывин встречаются поваленные деревья, кустарники (рис. 2, 3).

Оплывины и оползни на территории останца, как считает профессор Кусковский В.С., связаны с несколькими факторами:

- очень крутые склоны логов, углы склонов 25-40 °;

Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича, 2009 г.

- градиенты потоков подземных вод, разгружающиеся на склонах, достигают десятых долей единицы;
- выход подземных вод в виде мочажин выше по склону от русла ручья;
- наличие суглинков со значительной примесью тонкозернистого песчаного материала;
- характер выхода подземных вод исключительно только рассеянный, нисходящий.



Рис. 2. Небольшой блок почвы весом примерно 43 тонны в одно мгновение перешел в жидкое состояние (золь) и медленно стек в виде грязевого потока (в 30 м выше по склону находится огород, а далее – жилой дом), осень 2007г., г.Ханты-Мансийск (фото А.В. Захарченко)



Рис. 3. Разрыв ствола кедра трещиной закола при смещении почвенного блока, г.Ханты-Мансийск, руч. Рыбный, июль 2007г., (фото А.В.Захарченко)

На наш взгляд, в данном перечне нет самого главного фактора – геологии останца. Нужно учитывать не только состав грунтов, но и геологическое строение района в целом. Если посмотреть на схематический геологический разрез останца (рис. 4) [1], где отмечены места выходов подземных вод и участки проявления экзогенных геологических процессов (ЭГП), то видно, что более интенсивные проявления ЭГП находятся в непосредственной близости от селитебной части останца. Это связано, на наш взгляд, с застройкой здесь территории жилыми зданиями, которые вызывают нарушение гидродинамического и температурного равновесия грунта и подземных вод.

Естественно, ЭГП связаны не только с антропогенным воздействием, но и с составом грунтов. Если посмотреть на разрез (рис. 2), то можно увидеть, что основная масса типично валунных суглинков и глин сконцентрирована в восточной части останца. Из всех разновидностей пород, слагающих останец, именно валунные суглинки и глины более всего подвержены пластическим деформациям, а также обладают тиксотропными свойствами. Это и предопределяет столь сильное проявление ЭГП именно на этом участке.

Все исследователи останца отмечают наличие в нём складок различного падения вплоть до лежащих, разрывные нарушения, надвиги, трещиноватость пород [2, 3]. В связи с

этим наблюдается крайняя невыдержанность распространения водоносных горизонтов, наличие опесчаненных линз, насыщенных водой. Разгрузка их осуществляется в ложе глубоких логов и оврагов, а также в бортах в виде мочажин, оплывин, небольших болот и большого числа рассеянных малодебитных источников.

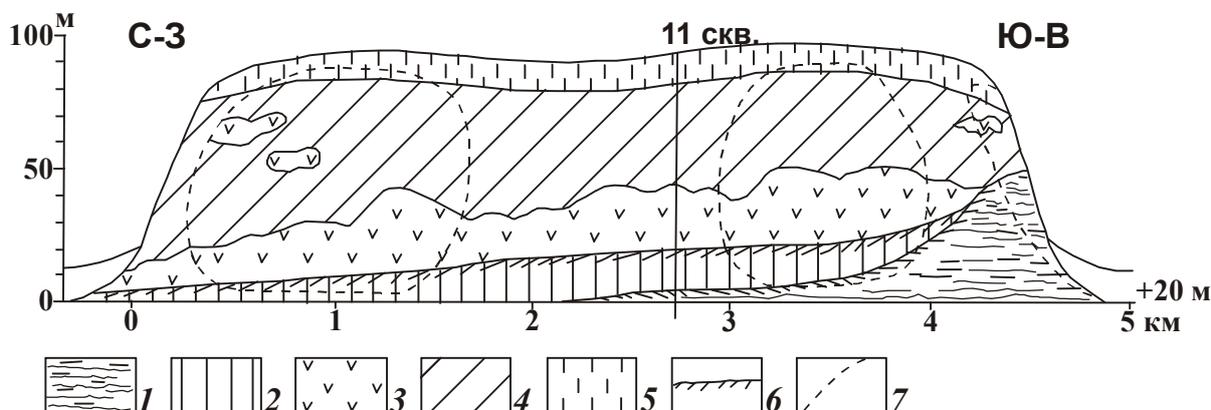


Рис.4. Основные толщи видимой части разреза Самаровского останца [1].

1 – нижняя бассейновая морена с зеркалами скольжения (Q^2_1); 2 – средняя толща ледниковых и водноледниковых образований ($Q^2_?$); 3 – палеоценовые и эоценовые породы (ледниковые отторженцы); 4 – верхняя толща ледниковых и водноледниковых отложений (Q^2_2), возможно ($Q^5_2+Q_3$); 5 – покровные облессованные озёрные алевриты и тонкозернистые пески (Q^4_3); 6 – основные поверхности скольжения; 7 – обнаженные участки склонов.

Из выше сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Основополагающее влияние на геоэкологическое состояние останца и проявления ЭГП в данном районе оказывает геология района. Сверх этого накладывается техногенный фактор. Последний лишь вызывает усиление ЭГП.
2. Разрез Самаровского останца (рис.4) может служить упрощенной моделью инженерно-геологической и геоэкологической обстановки района.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кусковский В.С. Гидро-инженерно-геологические условия территории г.Ханты-Мансийска. Учебное пособие. – Ханты-Мансийск: РИЦ ЮГУ, 2004. – 56 с.
2. Крапивнер Р.Б. Новые данные о геологическом строении района Самаровского останца // Материалы к проблемам геологии позднего кайнозоя. Л.: Изд. НИИГА, 1969. 15с.
3. Сухорукова С.С. Текстуры и состав морен Самаровской горы на Иртыше // Проблемы стратиграфии и палеогеографии плейстоцена Сибири. Новосибирск: «Наука», 1982. С.58-66.

УДК 550.361

Сравнительный анализ геотермического поля солянокупольных бассейнов Северной Евразии

М.Д. Хуторской, Е.А. Тевелева, Г.И. Урбан, Л.А. Цыбуля
 тел.: (495)959-2756; факс: (495)951-0443 e-mail: mkhutorskoy@ginras.ru
 Геологический институт РАН, Москва

Соленосные толщи имеют глобальное распространение и составляют значительный объем осадочных отложений многих седиментационных бассейнов мира. Это уникальные по генезису и условиям залегания толщи, интенсивное формирование которых происходило на протяжении всего фанерозоя от кембрия до современного времени. С этими толщами связаны многие полезные ископаемые, прежде всего нефть и газ. Около половины

нефтегазоносных провинций и областей приурочены к соллеродным бассейнам. В их пределах широко распространены термальные и промышленные воды и рассолы, сосредоточены колоссальные объемы галита и калийных солей, отмечаются месторождения серы, гипса и др. полезных ископаемых. Совершенно понятно, почему несмотря на длительную историю и достигнутые успехи в изучении соллеродных бассейнов, интерес к ним всё возрастает. Важное место в этих исследованиях принадлежит геотермии.

Эвапоритовые отложения обладают аномальными теплофизическими свойствами по сравнению с терригенными или даже вулканогенно-осадочными породами. Они характеризуются высокой теплопроводностью и температуропроводностью и малой теплогенерацией. Особенно ярко это проявляется в отношении галита. Теплопроводность галита без примесей составляет 4,7-5,5 Вт/(м·К). Если в результате тектонической и гравитационной неустойчивости сформировалась солянокупольная структура, то она является концентратором глубинного теплового потока. Естественно, в смежных межкупольных пространствах тепловой поток из-за этого уменьшается. Таким образом, в условиях солянокупольной тектоники наблюдается резкая пертурбация глубинного теплового потока, что часто фиксируется при геотермических измерениях в скважинах, когда рассчитанные значения теплового потока в пределах соляных куполов и межкупольных зон различаются в 1,5-2 раза. Количественный расчет температур в недрах ниже уровня забоя скважин, а также фонового теплового потока, свободного от влияния структурно-теплофизических неоднородностей, может быть осуществлен только на основе численного моделирования.

В качестве объектов исследований нами выбраны наиболее изученные солянокупольные структуры Северной Евразии: Прикаспийская и Северо-Германская впадины, расположенные в краевых частях Восточно-Европейской платформы, а также Припятский прогиб, являющийся типичным внутриплатформенным соллеродным бассейном. В Прикаспийской и Северо-Германской впадинах формирование соленосных толщ происходило в нижней и верхней перми, соответственно, в Припятском прогибе – в верхнем девоне.

Прикаспийская впадина традиционно выделяется в границах солянокупольной области. Ее северо-западным ограничением служит предкунгурский тектоно-седиментационный уступ высотой до 1500 м, который непрерывно протягивается в субмеридиональном направлении от г. Котельниково на юге через Волгоград до Саратова на севере, а далее резко поворачивает на восток, проходя по широте Уральска до Оренбурга. С востока впадина ограничена складчатыми структурами Урала, с юго-востока – Южно-Эмбинским палеозойским приразломным поднятием и с юго-запада – Донбасс-Туаркырской системой инверсионных поднятий. В очерченных границах Прикаспийская впадина оформилась как замкнутый бассейн только к концу ранней перми, когда были образованы орогенный пояс Урала на ее восточных границах и инверсионное поднятие на месте Донбасс-Туаркырской рифтовой системы. До этого момента различные ее части входили в состав разных седиментационных бассейнов.

Особенностью строения осадочного чехла Прикаспийской впадины является присутствие в разрезе эвапоритов кунгурского яруса перми, имеющих форму куполов и штоков вследствие тектонической и гравитационной неустойчивости. Они представлены в основном каменной солью с редкими включениями сульфатов и прослоями разной мощности сульфатно-терригенных пород – аргиллитов, песчаников и ангидритов. Углы падения этих пород изменяются от нескольких градусов до 75°, что связано с пластическим перемещением соли из межкупольных зон в ядра соляных массивов. Купола прорывают или часть верхнепермских отложений, или все полностью. В одних случаях из-за прекращения роста куполов вышележащие мезозойские породы остаются в горизонтальном залегании, в других – рост продолжается и образуется наклон надсолевых слоев, зависящий от времени и скорости подъема соли. В плане купола имеют округлую, эллиптическую, удлиненную или

звездообразную форму. Округлая форма характерна для центральной части впадины, а удлинённая – для ее бортовых зон [1].

Рефракция теплового потока – эта главная причина неоднородности теплового поля в Прикаспийской впадине. Анализируя эмпирические данные, можно видеть, что положительные аномалии теплового потока над соляными куполами создаются, в основном, за счет структурно-геологических неоднородностей и присутствия "теплопроводов" – толщ каменной соли.

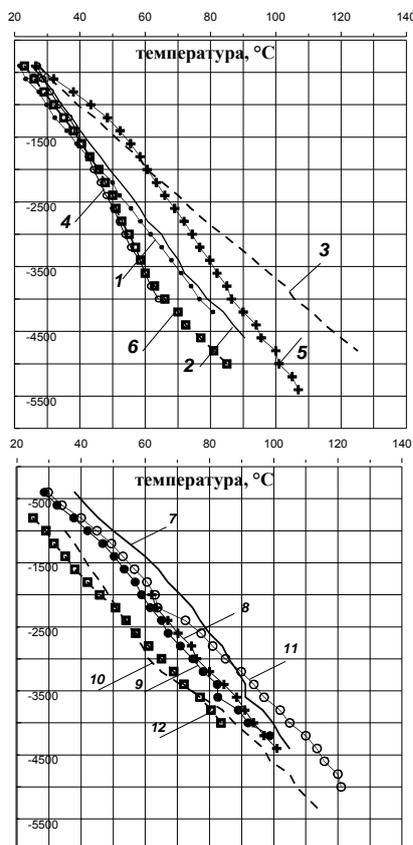


Рис.1. Термограммы некоторых глубоких скважин в Прикаспийской впадине.

*Скважины: 1 – Блаксай-89п; 2 – Каратюбе-34; 3 – Каратюбе-35; 4 – Кумсай-2; 5 – Биикжал-СГ2;
6 – Курсай-4; 7 – Терескей-1п; 8 – Тепловская-1п; 9 – Зап.-Тепловская-2п; 10 – Ташлинская-25п;
11 – Аралсорская-СГ1; 12 – Хобдинская-1.*

Несмотря на массовую термометрию скважин Прикаспийской впадины, обобщений таких данных относительно мало. Можно указать на работы И.Б.Дальяна, Ж.С.Сыдыкова и др. по восточной части впадины [2-4], В.С.Жеваго – по центральной и восточной частям впадины [5], А.В.Дружинина – по западной части [6].

Основной объем фактических данных по геотермии региона был собран в период составления Геотермической карты СССР [7] и находился в архивах Лаборатории геотермии Геологического института АН СССР в виде копий термограмм. Этот материал, а также данные, опубликованные позднее, явились основой для наших исследований. В результате этой работы была получена информация о температурах в 115 скважинах региона, в том числе в 16 глубоких (4 и более км) (рис.1).

На трехмерной модели температур (рис.2) видно явное повышение температуры на глубинных срезах с северо-востока на юго-запад. Так, в восточной части впадины на границе с Мугоджарами, температуры на глубине 2 и 3 км составляют, соответственно, 40-45 и 60-65°C, а в районе Южной Эмбы и Мангышлака на тех же глубинах – 55-60 и 70-75°C. Это в

первом приближении согласуется с выводом о снижении теплового потока в восточной части Прикаспийской впадины, причиной которого являются нестационарные процессы экранирования глубинного теплового потока, проявившиеся на Южном Урале и в Мугоджарах [8].

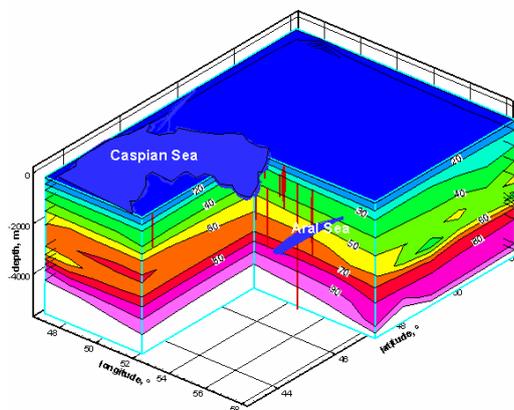


Рис.2. Трехмерный плот, показывающий фактическое распределение температур (°С) в Прикаспийской впадине

Из анализа зависимости забойных температур от глубины скважин была выведена формула, связывающая температуру (Т) и глубину забоя (Z): $T = (274,86 + Z) / 45,80$. Если принять $Z = 0$, то $T = 6^{\circ}\text{C}$. Примерно такая температура была реально зафиксирована на "нейтральном слое" (на глубине 20-30 м) при термозондировании.

С помощью регрессионной зависимости было также рассчитано значение среднего геотермического градиента в интервале глубин скважинных измерений (21,8 мК/м).

Температуры в земной коре до глубины 50 км проявляют ту же тенденцию, что и в интервале бурения скважин, т.е. они плавно увеличиваются в юго-западном направлении. В восточной части впадины на границе М температура составляет 400°C , т.е. такая же как и под складчатыми сооружениями Южного Урала и Мугоджар [8], а в Центрально-Прикаспийской депрессии, и особенно в районе Южной Эмбы, на М достигается температура $450-500^{\circ}\text{C}$.

От меридиана Мугоджар в западном направлении изотермы, поднимаясь, образуют купол, вершина которого приурочена к районам Южной Эмбы, сора Мертвый Култук и Северного Мангышлака. Заметим, что отмечавшаяся нами ранее пространственная корреляция температурных куполов и зон промышленной нефтегазоносности в Печорском бассейне Баренцева моря и в Южно-Карской впадине [9], проявляется и в данном случае, т.к. названные районы Республики Казахстан – это районы интенсивной добычи углеводородного сырья.

Припятский субширотный прогиб расположен между Белорусской и Воронежской антиклизмами и разделяющей их Жлобинской седловиной на севере и Украинским щитом на юге. Протяженность его составляет 280 км и ширина до 150 км. Припятский прогиб ограничен с севера и юга глубинными разломами. Внутри прогиба также прослеживается ряд субширотных разломов, некоторые из них в северной зоне также мантийного заложения. В срединной части впадины выделяется рифтогенная структура – Припятский грабен. Припятский прогиб сформировался в герцинский этап. Он выполнен отложениями среднедевонского-среднетриасового структурного комплекса. Максимальная мощность платформенного чехла составляет 5,5 – 6 км. В разрезе чехла выделяется две соленосные толщи верхнедевонского возраста, разделенные карбонатно-глинистой межсолевой толщей. Наибольшее развитие получила верхнесолевая толща. Ее максимальная мощность достигает

3 км и установлена вблизи северного борта прогиба. В центральной части прогиба мощность колеблется от 0,6 до 2,5 км, на юге – 0,7-2 км. Верхняя соляная толща, в отличие от нижней, характеризуются ярко выраженной соляной тектоникой – наличием куполов, криптодиapiroв, валов и т.д.

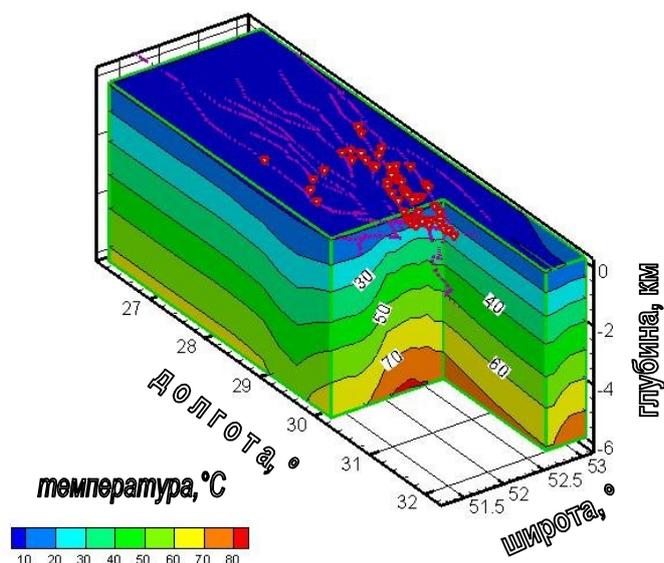


Рис.3. 3D-температурная модель Припятской впадины.

Треугольники – локализация нефтяных месторождений, линиями на поверхности показаны разломы

Геотемпературная характеристика прогиба основывается на термометрических измерениях в 200 глубоких скважинах. В большинстве из них выполнен расчет теплового потока [11]. Основная часть скважин располагается в северной зоне прогиба. В меньшей степени изучен юг рассматриваемой структуры. В южной прибортовой зоне тепловой поток составляет в среднем 50 мВт/м^2 , а в северной – $60-70 \text{ мВт/м}^2$. Повышенные тепловые потоки приурочены к разломам, глубоко проникающим в низы земной коры. Важно отметить, что нефтяные месторождения приурочены к глубинным разломам субширотной ориентации и сосредоточены, главным образом, в пределах аномалий высоких тепловых потоков северной зоны (рис.3).

На 3D-модели распределение температур Припятского прогиба четко выделяются «температурные купола» и «температурные впады», пространственно совпадающие с локализацией месторождений углеводородов.

Северо-Германская впадина (СГВ) – это район широкого распространения соляных куполов и валов цехштейнового возраста (верхняя пермь-нижний триас). В южной и юго-западной частях бассейна купола имеют изометричное (иногда звездчатое) строение, а в северной и северо-восточной – линейное. Солянокупольные структуры бассейна достаточно полно изучены в геотермическом плане. Немецкими, польскими и голландскими исследователями опубликованы термометрические данные, полученные в более чем 100

скважинах. Интервал измерений в скважинах по глубине составляет от 1500 до 4000 м. Это позволило уверенно оценить глубинный тепловой поток в СГВ. Он изменяется от повышенных значений в западной части (70-75 мВт/м²) до нормальных фоновых для позднепалеозойской коры – в восточной части (55-60 мВт/м²).

Соответствующие значения глубинного теплового потока были заданы в качестве граничных условий при проведении трехмерного геотермического моделирования с целью определения температур ниже интервала непосредственных измерений. Моделирование проводилось вдоль геотраверсов, полученных по данным ГСЗ и МОВ-ОГТ [12]. В результате моделирования отображена 3D-структура температурного поля (рис.4), на котором, так же как и для двух вышерассмотренных бассейнов, отмечается приуроченность месторождений углеводородов к «термическим куполам» - зонам подъема изотерм.

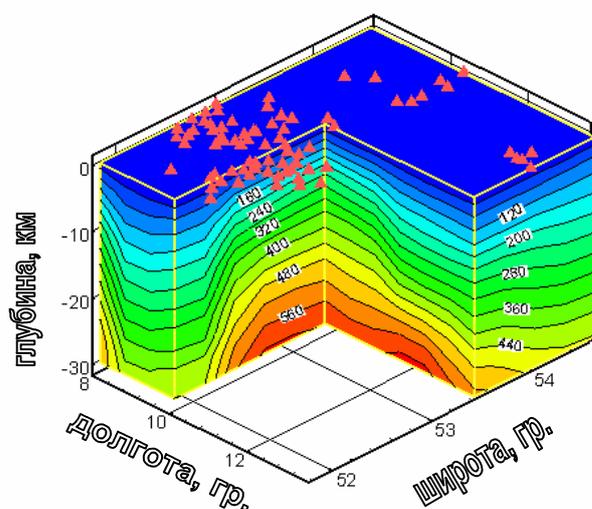


Рис.4. 3D-температурная модель Северо-Германской впадины
(Условные обозначения см. на рис.3)

В результате сравнительного анализа геотемпературного поля солянокупольных бассейнов установлена единая тенденция связи локализации месторождений и геотермического поля – максимальная концентрация залежей углеводородов контролируется подъемом изотерм, формирующих «термические купола».

ЛИТЕРАТУРА

1. Хуторской М.Д. Особенности теплового потока в восточной части Прикаспийской впадины //Геотектоника, №3, 1979. С.97-102.
2. Дальян И.Б., Посадская А.С. Геология и нефтегазоносность восточной окраины Прикаспийской впадины. Алма-Ата: Наука, 1972. 192 с.
3. Дальян И.Б., Сыдыков Ж.С. Геотермические условия восточной окраины Прикаспийской впадины //Сов. геология, №6, 1972. С.126-131.
4. Гидрогеотермические условия Арало-Каспийского региона. Алма-Ата: Наука, 1977. 184с.
5. Жеваго В.С. Геотермия и термальные воды Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1972. 253 с.
6. Дружинин А.В. О связи между геотермическим режимом осадочной толщи и строением кристаллического фундамента. //Геология нефти и газа, №3, 1961. С.20-25.

7. Геотермическая карта СССР /Под ред. Ф.А.Макаренко. М.: ГУГК СССР, ГИН АН СССР, 1972.
8. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: Изд-во РУДН, 1996. 289 с.
9. Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна //Геотектоника, 2003. №3, С.79-96.
10. Хуторской М.Д., Антипов М.П., Волож Ю.А., Поляк Б.Г. Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины //Геотектоника, №1, 2004. С.63-73.
11. Цыбуля Л.А., Левашкевич В.Г. Тепловой поток Припятского прогиба и причины его неоднородности //Геол. журнал, 1990, №4. С.21-38
12. Mazur S., Scheck-Wenderoth. M. Constraints on the tectonic evolution of the Central European Basin System revealed by seismic reflection profiles from Northern Germany //Netherlands Journal of Geosciences. N 84(4), 2005. P.389-401.

УДК 550.831.017

Гравитационное поле: локальные и региональная составляющие

М.С. Чадаев¹, В.А. Гершанок², П.Н. Новикова¹

(342) 216-10-08, факс (342) 216-75-02, Gp_tms@mi-perm.ru

¹Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский государственный университет, Пермь, Россия

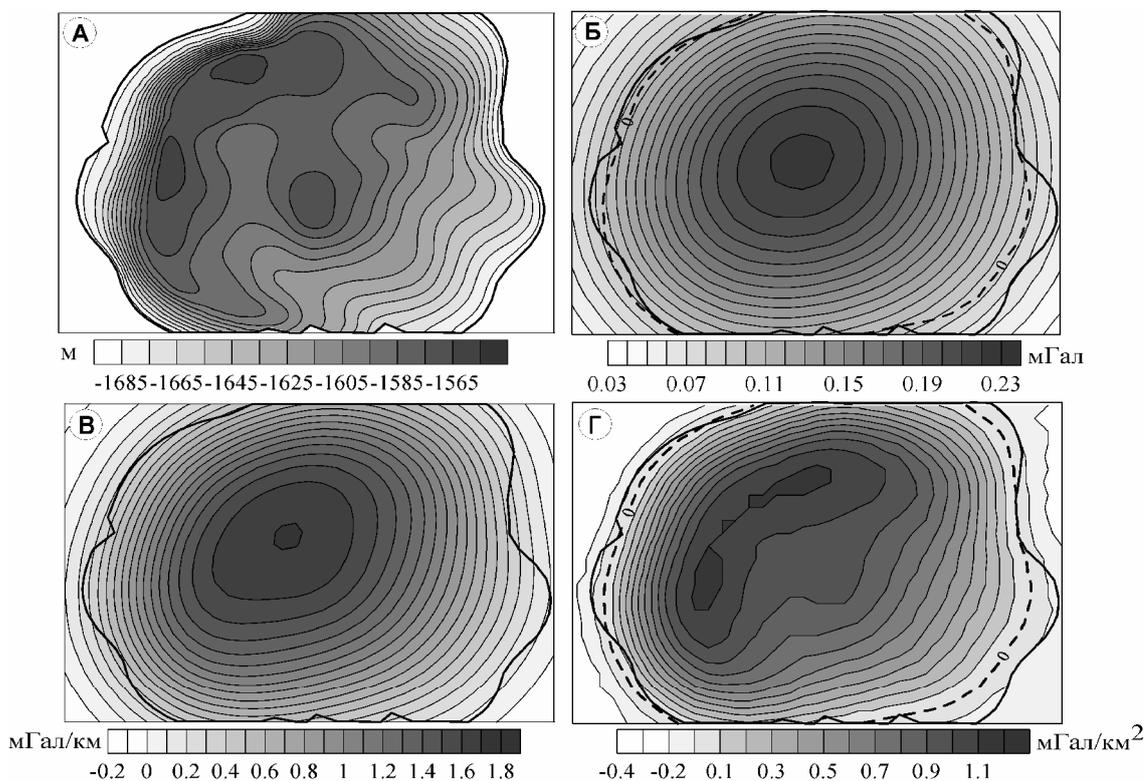
Привлечение геологической информации о распределении аномальных масс и данных о структуре гравитационного поля $\Delta g_{\text{набл}}$ для разделения явно выраженных и прогнозируемых локальных аномалий силы тяжести $\Delta g_{\text{лок}}$ позволяет уточнить их размеры, интенсивность и другие характеристики. Для анализа наблюдаемого поля силы тяжести $\Delta g_{\text{набл}}$ применены свойства третьей вертикальной производной потенциала V_{zzz} . За счет высокочастотной составляющей высшие производные по сравнению с первыми и вторыми производными потенциала имеют повышенную разрешающую способность, так как менее чувствительны к боковым массам. Производные не зависят от постоянного и изменяющего по линейному закону поля (естественно и от влияния боковых масс), эффективно определяют форму аномального тела, так как уверенно выделяются их экстремумы. Нулевые экстремальные значения с достаточной для практики точности характеризуют положение и размеры выделяемых аномалий. В случае горизонтальной полуплоскости, вертикальной ступени конечной амплитуды на профиле имеется лишь одна нулевая точка [1].

Экстремальные нулевые значения поля V_{zzz} переносят на карту или график аномалий силы тяжести Δg . Пункты, со значениями V_{zzz} , равными нулю, содержат в поле $\Delta g_{\text{набл}}$ только региональную составляющую $\Delta g_{\text{рег}}$. Поэтому участки (интервалы) локальных аномалий между нулевыми точками при построении карты (графика) регионального фона $\Delta g_{\text{рег}}$ не учитывают. Аномалии $\Delta g_{\text{лок}}$ получают за счет разности полей $\Delta g_{\text{набл}}$ и $\Delta g_{\text{рег}}$.

При наличии неявно выраженных в поле $\Delta g_{\text{набл}}$ локальных аномалий, т. е. не имеющих нулевых экстремальных точек производной V_{zzz} , или их неполном числе, процесс разделения требует тщательного анализа. Рассмотрен модельный пример.

На рисунке приведена структурная карта кровли фаменских отложений (рис., А) по Озерному месторождению нефти [2]. Размеры поднятия: 6300x3700 м, амплитуда 130 м. Поднятие несимметрично, имеется несколько структурных элементов, в том числе в виде «гребня» на западе. Расчетное поле первой вертикальной производной V_z представлено на рис.1, Б. Максимальная амплитуда равна $0,23 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ (0,23 мГал) при аномальной плотности $0,10 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ($0,10 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Поле второй вертикальной производной V_{zz} с максимальным значением $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-2}$ ($1,8 \text{ мГал} \cdot \text{км}^{-1}$) дано на рис., В. По сравнению с полем

V_z в большей степени выявляется несимметричность поднятия относительно оси северо-восточного направления. Поле третьей вертикальной производной потенциала (рис., Г) имеет отчетливо выраженный дифференцированный характер. Максимальная амплитуда достигает $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}$ ($1,2 \text{ мГал} \cdot \text{км}^{-2}$). Осложняющие поднятие детали строения, в том числе «гребень» (рис., А), находят отражение в гравитационном поле V_{zzz} (рис., Г). Однако амплитуда их не превышает $0,2 \text{ мГал} \cdot \text{км}^{-2}$, что составляет примерно 15% от максимального значения поля. Экстремальная нулевая изолиния поля V_{zzz} (на рис., Г показана пунктирной линией) характеризует размеры поднятия в его основном объеме. Транспортируя нулевые значения V_{zzz} в поле V_z и полагая, что периферийная область не осложнена локальными аномалиями, была построена карта регионального фона. Гравитационный эффект выделяемых структурных элементов составил порядка $0,01 \text{ мГал}$, или 5% от максимального значения поля. Для рассмотренной модели без анализа карты V_{zzz} , полученной при решении прямой задачи, выделить такого рода неоднородности практически было бы невозможно.



Расчетное гравитационное поле Озерного месторождения:

А - структурная карта кровли фаменских отложений; гравитационное поле:

Б - V_z , В - V_{zz} , Г - V_{zzz}

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабушевич И.А. Высшие производные потенциала силы тяжести и возможности их использования в геологической гравиметрии. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. – 268 с.
2. Губина А.И. Основы фациальной цикличности осадочных толщ по результатам геолого-геофизических исследований скважин. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 271 с.
