

УДК 550.361

Веселов О.В.¹, Гордиенко В.В.²

ОБ ОДНОЙ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ИСКАЖЕНИЯ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА В ПРИДОННОМ СЛОЕ МОРСКИХ ОСАДКОВ

Представлено описание возможного механизма искажений геотермического градиента в придонном слое морских илов под влиянием деградации газовых гидратов. Расчетами показана значительная величина искажений.

Введение. Тепловой поток Земли (ТП) в море определяется в осадках на небольшой глубине (первые метры) под поверхностью дна по геотермическому градиенту (γ) и теплопроводности пород (λ). Величина γ может быть существенно искажена влиянием различных помех: отличием палеоклимата от современного, быстрой седиментацией и радиогенной теплогенерацией в молодых осадках, подъемом элизионных вод, субмаринной разгрузкой гидротерм и др.. Для учета этих факторов в морской геотермии используются различные системы поправок, введение которых позволяет приблизить наблюдаемую величину геотермического градиента к соответствующей глубинному (неискаженному) значению теплового потока [2 и др.].

Однако нельзя считать, что существующая система поправок учитывает все возможные искажения. На ее неполноту указывают, в частности, зоны очень низких значений ТП, встречающиеся в разных морях. В пределах этих зон величины теплового потока иногда сокращены до столь низких (вплоть до субнулевых), что их практически невозможно объяснить глубинными причинами – влиянием вариаций теплогенерации в коре и мантии Земли и предшествующей историей тепломассопереноса в тектоносфере. В Восточно-Черноморской впадине значения ТП в некоторых пунктах падают до 20-25 мВт/м², во впадинах ТИНРО и Дерюгина Охотского моря – до 18-30 мВт/м², в Каролинской котловине – до 4-28 мВт/м², в Филиппинском море – до 24 мВт/м², на поднятии Капингамаранги – до 15-30 мВт/м² [2-4 и др.].

В статье предпринята попытка обосновать необходимость учета не рассматривавшейся ранее помехи: оценить возможный эффект искажающего влияния двух связанных процессов – современного глобального потепления и деградации слоя газогидратов (ГГ). Возможность последнего нарушения нормального геотермического градиента в придонных осадках Охотского моря упоминается в статье [1]. Можно предполагать, что изменение γ обусловлено разложением газогидратов под влиянием неболь-

¹ © Веселов О.В., Гордиенко В.В.²

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ² Институт геофизики НАН Украины, Киев,

шого нагрева зонда и прилегающих осадков при его внедрении в дно. Однако, скорее всего небольшая величина теплового импульса и времени наблюдения не позволяет возникнуть такому эффекту.

Постановка задачи и параметры среды. Рассматриваемые ниже явления не привязаны к конкретной акватории. В процессе анализа используются осредненные параметры среды, в которой происходит теплоперенос. Принимались и другие предположения, упрощающие расчеты, но принципиально не искажающие их результаты. Во многом это связано с отсутствием необходимой информации, которая позволила бы провести работу на базе точных данных. Предполагалось, что процесс глобального потепления затрагивает не только сушу, но и акватории и проявляется в увеличении температуры (T) придонной воды со скоростью около $1^{\circ}\text{C}/100$ лет. Соответственно растет T в придонном слое илов, что ведет к изменению pT -условий существования слоя газогидратов. Естественно, такое явление вероятно только в местах распространения ГГ, но можно предположить, что при достаточно низких температурах дна, характерных для глубин моря более 500-700 м [1], газогидраты, по крайней мере катагенетические, встречаются в приповерхностном слое нередко. Увеличение T при неизменном давлении вызывает разрушение ГГ, сопровождаемое поглощением тепла в количестве примерно $5 \cdot 10^6$ Дж/м³ [5] (при обычной концентрации ГГ в илах на уровне 10%). Нагревание сверху и охлаждение на небольшой глубине должно приводить к существенному сокращению геотермического градиента как раз в интервале глубин, где он определяется. Поэтому имеет смысл рассмотреть соответствующую тепловую модель.

Величина λ считалась постоянной во всем рассматриваемом разрезе – 1 Вт/м⁰С (до глубин 20-25 м). Объемная теплоемкость среды (смеси примерно равных количеств воды и твердых частиц) оценена как $3,3 \cdot 10^6$ Дж/м³·⁰С. Соответственно температуропроводность (a) – около $3 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Для упрощения расчетов принято предположение о расположении кровли слоя газогидратов непосредственно на дне моря и совпадении неискаженного геотермического градиента с градиентом температуры разложения газогидратов [6 и др.] – около $0,05^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Эта ситуация отвечает широко распространенной величине ТП – 50 мВт/м².

Включение в рассматриваемый процесс гипотетического глобального потепления связано с тем, что обычные изменения pT -условий в придонном слое осадков не приводят к разрушению газогидратов. С геологически быстрым накоплением осадков связаны заметные искажения величины γ в придонном слое, оценки которых приведены, в частности, в работе [2]. В анализе не учитывался факт существования газогидратов. Скорость накопления осадков может достигать значительных величин (например, в некоторых районах Черного моря – до 3000 м в течение атропогена), осадки с газогидратами попадают на большей глубине под дном в новые pT -условия. Но пониженный по сравнению с нормальным (устанавливаемым при отсутствии седиментации) геотермический градиент в верхней части формирующегося осадочного слоя обуславливает

сохранение ГГ в прежнем виде, дополнительные тепловые эффекты не возникают. В случае некомпенсированного седиментацией погружения дна моря увеличивается давление вышележащей водной толщи на слой осадков с газогидратами, и при неизменности или понижении донной температуры (вполне вероятных на больших глубинах) новые рТ -условия не способствуют разложению ГГ. И в этом случае нет оснований для появления аномальных тепловых эффектов.

Методика расчета. Довольно большая скорость процесса и незначительная мощность охваченного им слоя позволяет рассматривать одномерную задачу теплопроводности. Изменение температуры среды под влиянием нагрева поверхности определялось как сумма эффектов отдельных поверхностных импульсов (T_{a1}) [2 и др.]:

$$\Delta T_1 = \sum T_{a1} \cdot (\Phi(z/2(a\tau_{11})^{0.5}) - \Phi(z/2(a\tau_{21})^{0.5}))$$

где z – глубина, τ_1 и τ_2 – возраст начала и конца импульса.

Расчет проведен для импульсов годичной длительности, интенсивность которых увеличивалась на $0,01^\circ\text{C}$ с каждым годом хода потепления, начинавшегося 10, 20 ...100 лет назад.

По условиям задачи любое повышение T ниже дна обуславливало разложение ГГ и возникновение отрицательного температурного импульса (T_{a2}) интенсивностью примерно $1,5^\circ\text{C}$ в элементарном слое. Суммарный эффект на глубине z рассчитывался как [2 и др.]:

$$\Delta T_2 = \sum 0,5T_{a2} \cdot (\Phi((h_{1i}+z)/2(a\tau_i)^{0.5}) - \Phi((h_{2i}+z)/2(a\tau_i)^{0.5}) + \Phi((h_{2i}-z)/2(a\tau_i)^{0.5}) - \Phi((h_{1i}-z)/2(a\tau_i)^{0.5}))$$

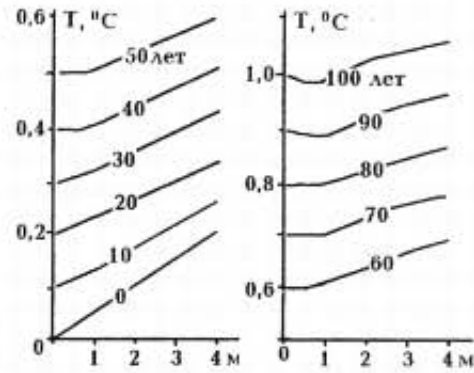
где: h_{1i} и h_{2i} – глубины кровли и подошвы i -го элементарного слоя, τ_i – возраст i -го элементарного слоя, определявшийся как время от середины интервала его формирования до момента расчета ΔT_2 . Мощность элементарного слоя соответствовала прогреву среды единичным поверхностным импульсом и составляла около 0,2 м (см. ниже).

Поскольку мощность слоя, в котором произошло разложение газогидратов, не была заранее известна для каждой длительности процесса потепления (т.к. она сокращалась отрицательным тепловым эффектом разложения ГГ), процесс расчета был итерационным. Количество элементарных слоев с отрицательными температурными импульсами подбирались так, чтобы на определенной глубине компенсировалась положительная аномалия T , созданная поверхностным нагревом. Ниже нее отрицательная аномалия T преобладала и газогидраты сохранялись.

Полная величина расчетной T в придонном слое ила определялась как сумма аномалий и нормальных температур, существовавших до начала процесса и отсчитанных от условного нуля.

Результаты расчета. Проведенные вычисления по описанной схеме показали, что уже сам процесс потепления дна моря может привести к заметному сокращению наблюдаемого геотермического градиента на обычных глубинах измерения температур под дном (0-4м). Результаты расчетов представлены на рис. 1.

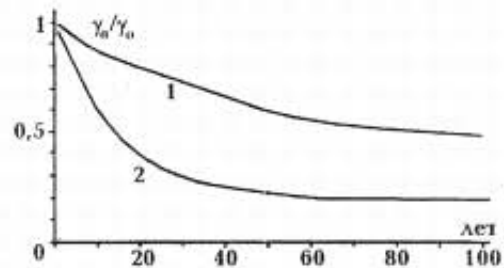
Рис. 1. Расчетные T на глубинах 0-4 м для различных длительностей процесса потепления дна.



Поскольку часто температура дна не применяется при расчете величины γ , для сравнения искаженного и неискаженного геотермического градиента использовано различие значений T на глубинах 1 и 4 м (рис. 2). С увеличением длительности процесса потепления искажение геотермического градиента в осадках стабилизируется на уровне около 50-60% начальной величины примерно через 50 лет.

Рис. 2. Изменение геотермического градиента на базе 1-4 м в зависимости от длительности процесса потепления дна.

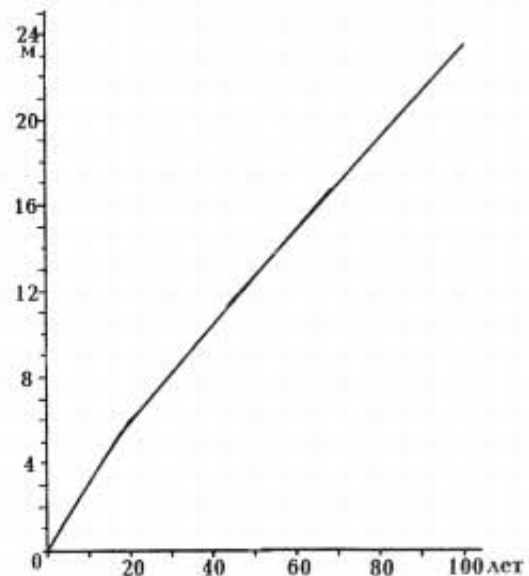
1 – в среде без газогидратов, 2 – в среде с газогидратами.



Расчет показал, что изменение глубины кровли слоя газогидратов происходит довольно равномерно со скоростью около 20 см в год. Только в начальный период (до 20 лет) скорость несколько повышена (примерно в полтора раза) (рис. 3).

Учет теплового эффекта разрушения слоя ГГ под дном моря делает искажения температур на глубине первых метров еще более значительным. Результаты соответствующего расчета представлены на рис. 4. Величина геотермического градиента, определенного на базе 1-4 м, существенно искажена по сравнению с существовавшей до начала процесса (см. рис. 2). Через 50 лет она стабилизируется на уровне около 20%. Таким резким понижением γ вполне можно объяснить большинство приведенных выше аномально низких значений теплового потока, установленных на фоне гораздо более высоких.

Рис. 3. Изменение расчетной глубины кровли слоя газогидратов в зависимости от длительности процесса потепления дна.



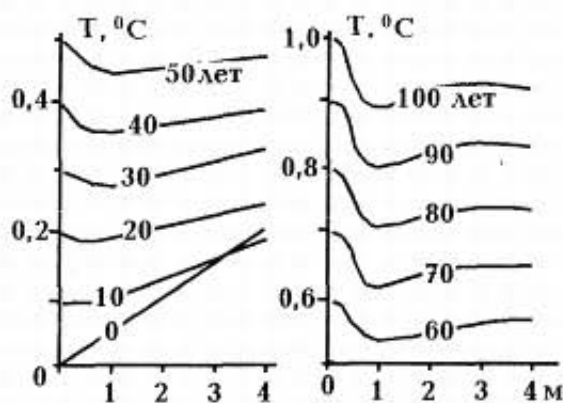


Рис. 4. Расчетные T на глубинах 0-4 м для различных длительностей процесса потепления дна с учетом теплового эффекта разрушения слоя газогидратов.

Видно, что при использовании для вычисления γ температуры дна можно получить и отрицательные значения (отвечающие тепловому потоку до минус 18 мВт/м²). Иногда такие величины теплового потока действительно фиксируются. Например, в Каролинской котловине установлены ТП минус 5, 24 и 29 мВт/м², в Филиппинском море – минус 49 мВт/м². Их появление приписано влиянию подводных оползней или гидротерм [3], но это объяснение нельзя признать верным.

При субмаринной разгрузке гидротерм слой, в котором определяется геотермический градиент, может попасть в погранзону адвективного теплопереноса, тогда величина γ будет повышена. При попадании слоя в расположенную ниже часть ячейки геотермический градиент может сократиться до субнулевого, но не до отрицательного значения.

Тепловую структуру, возникающую при оползневых процессах, в упрощенном виде можно представить как результат мгновенного появления над ранее существовавшей поверхностью дна нового слоя, причем в аллохтоне и автохтоне в момент события еще сохраняется прежнее распределение T . В дальнейшем отличия температуры от нормальной в придонном слое будут зависеть от мощности аллохтона и времени, прошедшего после оползня. Очевидно, что они могут быть только отрицательными и не способствуют разложению газогидратов. Тем не менее, оползни могут привести к существенному сокращению геотермического градиента, поэтому есть смысл рассмотреть возникающие эффекты, используя описанную выше методику. Результаты расчета приведены на рис. 5.

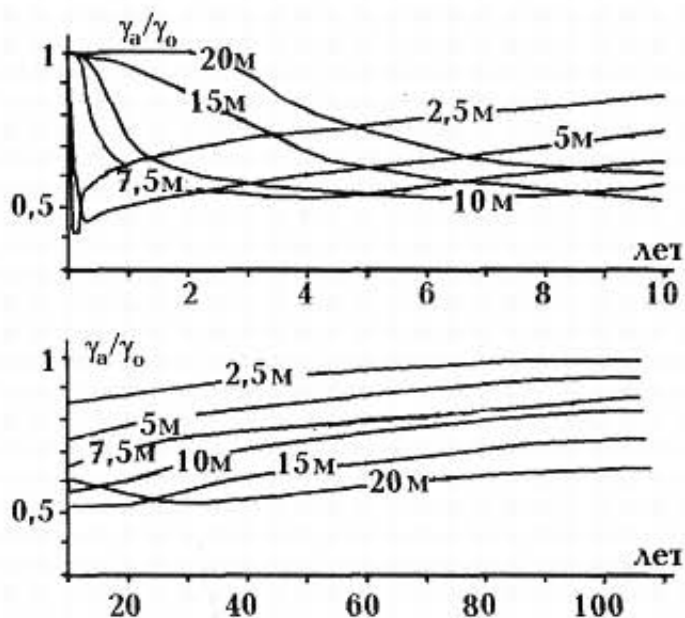


Рис. 5. Изменение геотермического градиента на базе 1-4 м в зависимости от мощности аллохтона и возраста оползня.

Видно, что возникающие искажения γ весьма значительны и сохраняются в течение длительного времени. Однако отрицательных значений можно ожидать только в довольно экзотической ситуации: непосредственно после оползня с незначительной мощностью аллохтона, когда нижняя точка измерения температуры попадает в автохтонные осадки.

Выводы. Приведенные в статье результаты анализа эволюции теплового поля под влиянием деградации газогидратов в придонном слое морских осадков нельзя рассматривать как материал для непосредственного внесения поправок в данные морской геотермии. Они могут расцениваться только как способ привлечения внимания специалистов к возможности появления значительных искажений γ такой природы. Для практического использования рассмотренной поправки необходимо получение сведений о наличии и глубине расположения слоя газогидратов, их составе (рТ -условиях существования), об изменении температуры дна в конкретном районе исследований (возможно, и не связанном с глобальным потеплением) и проведение на их основе расчетов, для которых можно использовать предложенную методику.

1. Веселов О.В., Гордиенко В.В., Куделькин В.В. Термодинамические условия формирования газогидратов Охотского моря // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. – 3. – С.

2. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Тепловое поле территории Украины. – К.: Знание Украины. – 2002. – 170с.

3. Соинов В.В., Веселов О.В., Кочергин А.В. и др. Тепловой поток северо-запада Тихого океана // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. III. – Юж.-Сахалинск. – 1997. – С.14-20.

4. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. / Гордиенко В.В., Андреев А.А., Биккенина С.К. и др. – Владивосток: ДО РАН. – 1992. – 220с.

5. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Особенности накопления природных газов в зонах гидратообразования Мирового океана // Докл. АН СССР. – 973. – т.212, №4. – С. 931-934.

6. Maekawa T. Equilibrium conditions of gas hydrate from mixtures of methane and ethane and outline of experimental apparatus for gas hydrate synthesis in porous sediment // Bull. Geol. Surv. Japan. – 1998. – V.49, №10. – P. 501-507.

Надано опис можливого механізму спотворення геотермічного градієнту у придонному прошарку морських відкладів впливом деградації газових гідратів. Розрахунками доведено значну величину спотворень.

The description of the possible mechanism of distortions of a geothermal gradient in the upper layer of the bottom sediments under influence degradation gas hydrates is submitted. The accounts show significant size of distortions.