ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ

УДК 550.362

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧЕРНОГО МОРЯ

Г. И. Петрунин, В. Г. Попов, А. В. Сосков

(*кафедра физики Земли*)

E-mail: geopopov@phys.msu.ru

На обширном экспериментальном материале, полученном авторами в ходе многолетних экспедиционных работ, анализируются основные факторы, влияющие на тепловые свойства донных осадков и их изменчивость в реальных условиях акваторий на примере Черного моря. Полученные результаты обсуждаются в связи с проблемами точности определения величины плотности тепловых потоков через дно внутренних и окраинных морей.

Введение

Измерения плотности теплового потока на больших акваториях являются одним из основных источников информации о глубинном потоке тепла из океанической литосферы. Действительно, температура придонных слоев грунта при значительных глубинах воды практически не меняется со временем и не испытывает влияния суточных, годовых и иных вариаций (например, для Черного моря такая ситуация наблюдается на глубинах, превышающих 400 м [1]). Соответственно это позволяет производить в осадках морского (океанического) дна измерения неискаженного градиента температуры.

С фундаментальной точки зрения изучение интенсивности теплопереноса на границе литосфера–гидросфера имеет важнейшее значение для понимания особенностей формирования и эволюции океанической коры. Геотермальная активность морского дна в целом и тонкая структура океанического теплового потока несут богатую информацию о характере и направленности геопроцессов в коре и верхней мантии. В практических целях такие исследования необходимы для решения задач разведки и использования полезных ископаемых (нефть, газ, газогидраты, полиметаллические конкреции, термальные воды).

Методика измерения кондуктивного теплового потока через дно океана базируется на уравнении Фурье

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T,$$

где λ — теплопроводность слоя осадков на базе измерения температурного градиента. Именно необходимость знания теплопроводности осадков для расчета теплового потока и стимулировала развитие техники и методики измерения коэффициента теплопроводности донных осадков во второй половине XX в.

В настоящее время число выполненных измерений теплового потока на акваториях исчисляется десятками тысяч и остро встает вопрос надежности публикуемых данных. Анализ результатов показывает, что существенные ошибки в определении тепловых потоков (до 50%) могут быть связаны с недостаточной точностью прямых измерений или расчета теплопроводности по ее эмпирическим зависимостям от влажности, не учитывающим структурно-текстурные особенности осадков, их минеральный состав и другие факторы [1, 2]. В результате в сводных обзорах по исследованию океанического теплового потока можно обнаружить значения теплопроводности осадков, отличающиеся в пять раз (0.33–1.5 Вт/(м·К)) и даже более [1, 3], при этом нижнее значение почти в два раза меньше теплопроводности воды, что трудно объяснимо, а верхнее приближается к величине λ магматических пород. Кроме того, практически отсутствуют данные по другим теплофизическим характеристикам: теплоемкости C_p и температуропроводности a, знание которых необходимо для понимания процесса теплопередачи в насыщенных неконсолидированных средах.

Цель настоящей работы — изучить по возможности наиболее полно и описать основные факторы, влияющие на поведение тепловых свойств (a, λ, C_P) донных осадков и их изменчивость в реальных условиях акваторий на примере Черного моря. Учет этих факторов, как нам представляется, мог бы повысить качество определения теплового потока по крайней мере для рассматриваемого региона. С другой стороны, полученные результаты должны способствовать более глубокому пониманию физического механизма теплопередачи в двухфазных дисперсных геофизических материалах, какими являются морские осадки.

Результаты измерений и их анализ

Использованный в настоящей работе экспериментальный материал собран авторами в ходе многолетних экспедиционных геотермических работ на акватории Черного моря. Были выполнены измерения всего комплекса теплофизических параметров на более чем 600 образцах донных осадков, поднятых на борт научно-исследовательского судна (НИС) грунтовыми трубками на 200 станциях. Измерения производились на борту НИС методом регулярного теплового режима II рода, на оригинальной установке, разработанной в лаборатории геотермии физического факультета МГУ [4]. Было предпринято также определение плотности ρ и влажности W осадка, удельного веса вещества твердой фазы, а в ряде случаев — минералогического и гранулометрического состава и содержания органического вещества. Для каждой станции фиксировались координаты отбора, глубина моря и положение образца в колонке (глубина залегания относительно дна моря). Все изученные образцы (не менее трех для каждой станции) были отобраны из поверхностного слоя осадков мощностью 2.0–2.5 м. Значительная часть образцов дублировалась, т. е. отбиралась и консервировалась для повторных измерений в лабораторных условиях на суше. Обработка измерений и анализ полученных результатов дали богатый материал, часть которого и представлена в настоящей публикации. В табл. 1 показаны диапазоны изменения теплофизических параметров как на всем изученном интервале влажности, так и на интервалах, средние значения которых отличаются на 10%. Включены также результаты измерений отдельных образцов с нетипичной очень высокой влажностью (68% — три образца, 72% — один образец), которые были отобраны в верхнем десятисантиметровом слое осадков. Нетрудно видеть, что концентрация жидкой фазы, представленная в осадках морской водой, обладающей низкой теплопроводностью и температуропроводностью ($\lambda = 0.6$ Вт/(м·К); $a = 1.48 \cdot 10^{-7}$ м^2/с) и высокой теплоемкостью ($C_P = 4180$ Дж/(кг·К)), более чем в пять раз превосходящей удельную теплоемкость твердой минеральной фазы при комнатной температуре, несомненно является доминирующим фактором (параметром), определяющим значения тепловых свойств насыщенных морских осадков. Зависимости $\lambda(W)$ и $a(W)$ для донных отложений, находящихся в состоянии двухфазной системы, имеют монотонно убывающий характер, что отражает постепенный переход с ростом влажности от высокотеплопроводного твердофазного монолита ($W = 0$) к низкотеплопроводной жидкости ($W = 100\%$). Так, с увеличением влажности от 25 до 65% теплопроводность понижается несколько менее, а температуропроводность — несколько более чем в 2 раза. Феноменологическая сторона такого почти идентичного поведения теплопереносных параметров (a и λ) насыщенных дисперсных сред от W понятна из рассмотрения формулы Дебая $\lambda = a C_P \rho$ и объясняется слабым ростом их объемной теплоемкости $C_P \rho$ на интервале изменения влажности, поскольку увеличение удельной теплоемкости с ростом влажности компенсируется уменьшением плотности ρ осадков (табл. 1).

Вообще, как показывают расчеты, с точностью до 5–7% удельная теплоемкость морских осадков как аддитивная функция компонентного состава легко может быть оценена по правилу Неймана–Коппа:

$$C_P = C_{PS}(1 - W) + C_{Pf} W, \qquad (1)$$

где в качестве удельной теплоемкости твердой фазы C_{PS} можно принять среднее значение для породообразующих минералов со средним атомным весом $M = 20$, равное 760‘Дж/(кг·К) [5], а для теплоемко-

Таблица 1

Крайние и средние значения теплофизических параметров изученных донных осадков Черного моря

W, %	ρ, кг/м^3	a, 10^{-7} м^2/с	C_P, Дж/(кг·К)	$C_P \rho$, кДж/(м^3·К)	λ, Вт/(м·К)
25–65	1200–1900	1.90–4.10	1580–3000	2800–3680	0.70–1.25
25–34.9	1780	3.40	1715	3000	1.05
	1650–1900	2.70–4.10	1580–1880	2800–3300	0.84–1.25
35–44.9	1650	2.80	2020	3235	0.92
	1480–1720	2.40–3.50	1670–2215	2925–3420	0.80–1.09
45–54.9	1430	2.40	2425	3280	0.80
	1300–1500	2.10–2.90	2300–2720	3050–3510	0.73–0.92
55–65	1330	2.15	2830	3515	0.78
	1210–1380	1.90–2.45	2510–3000	3345–3680	0.70–0.86
68	1200	1.85	3095	3705	0.70
	1180–1230	1.75–2.00	3010–3175	3595–3760	0.67–0.72
72	1150	1.70	3260	3720	0.65

сти жидкой фазы C_{Pf} — среднюю теплоемкость морской воды, близкую к классическому значению для воды в целом. Более детальный анализ поведения a и λ от процентного содержания воды в осадках показывает, что для каждой конкретной влажности из измеренного интервала диапазон разброса этих параметров может достигать 30–40% и более, что явно превосходит точность измерений ($\Delta a/a \sim 3\%$; $\Delta\lambda/\lambda \sim 7 \div 9\%$). Специальное изучение этого вопроса показало, что обнаруженные вариации тепловых свойств, как и предполагали ранее некоторые исследователи [6, 7], связаны с вариациями минерального и гранулометрического состава осадков. Наиболее низкие значения a и λ характерны для кокколитовых и древнечерноморских тонкодисперсных сапропелевых илов, содержащих органику, а наиболее высокие — для новоэвксинских глинистых илов, включающих прослои более крупнозернистого песчаного терригенного материала.

Следует также отметить, что значительную роль в формировании величины тепло- и температуропроводности донных осадков играет не только средний размер частиц, но и соотношение между мелко- и крупнодисперсными фракциями. Как показывают эксперименты, даже при неизменном (или меняющемся незначительно) среднем размере частиц изменение соотношения между фракциями может привести к значительному изменению тепловых свойств. Более того, в ряде случаев изменение соотношения между гранулометрическими фракциями может приводить к более значительным вариациям тепло- и температуропроводности, чем при изменении среднего размера частиц. Этот факт может быть проиллюстрирован, например, сравнением результатов изучения двух литологически близких черноморских образцов, отобранных из одной колонки (табл. 2). Образцы идентичны по минералогическому составу, плотности и пористости; в обоих преобладает пелит-алевритовая фракция, доля которой составляет около 90%, но один из образцов содержит небольшое количество песчано-гравийной фракции ($\sim 10\%$). Это не приводит к сколь-нибудь значительному различию между образцами по среднему размеру частиц, однако теплопроводность образца, содержащего песок и гравий, оказывается повышенной на 20%, что весьма существенно.

Таблица 2

Результаты измерения тепловых параметров двух образцов донных осадков Черного моря

(П — пелит, А — алеврит, Пс — песок, Г — гравий)

Образец	П + А, %	Пс, %	Г, %	W, %	ρ, г/см^3	a, 10^{-7} м^2/с	λ, Вт/(м·К)
ЧМ-95-4/1	85–90	5–10	5	32	1.655	3.22	1.11
ЧМ-95-4/2	95–98	2–5	0	32	1.655	2.70	0.88

Что касается влажности в диапазоне значений, характерном для реальных донных осадков (25–65%), зависимость $\lambda(W)$ при неизменных прочих параметрах, как показано в ряде работ (см., напр., [6]), достаточно хорошо аппроксимируется уравнением вида

$$\lambda = 1/(A + BW), \qquad (2)$$

где A и B — эмпирические константы. Для донных осадков Черного моря авторы дают следующие значения аппроксимационных параметров: $A = 0.57$ и $B = 0.011$ при измерении теплопроводности в Вт/(м·К) и влажности в процентах. Однако, как свидетельствуют результаты наших исследований тепловых свойств черноморских донных осадков, одни и те же значения параметров A и B не могут быть использованы для удовлетворительного прогнозирования их теплопроводности по всей акватории Черного моря, что связано со значительным влиянием на тепло- и температуропроводность осадков их механических и литологических характеристик, обусловленных особенностями осадконакопления. Более того, результаты измерения тепловых параметров донных осадков Черного моря показывают, что даже в пределах одного литологического типа осадков существуют весьма значительные вариации их тепло- и температуропроводности. Так, например, теплопроводность наиболее распространенных серых глинистых илов плейстоцен-голоценового возраста при значениях влажности 40–50% меняется от 0.8 до 1.2 Вт/(м·К). Это свидетельствует о том, что помимо влажности на величину теплопроводности оказывают весьма значительное влияние и другие факторы, обусловленные, очевидно, особенностями осадконакопления: размеры частиц и их ориентация, флуктуации минерального состава, глубина моря и др.

Для наиболее распространенного в Черном море типа осадков (вышеупомянутых серых глинистых илов) наиболее четкая и значительная дифференциация тепловых свойств по зонам осадконакопления наблюдается на акватории, примыкающей к кавказскому побережью. Нами были сопоставлены зависимости теплофизических свойств данных илов от влажности, характерные для различных

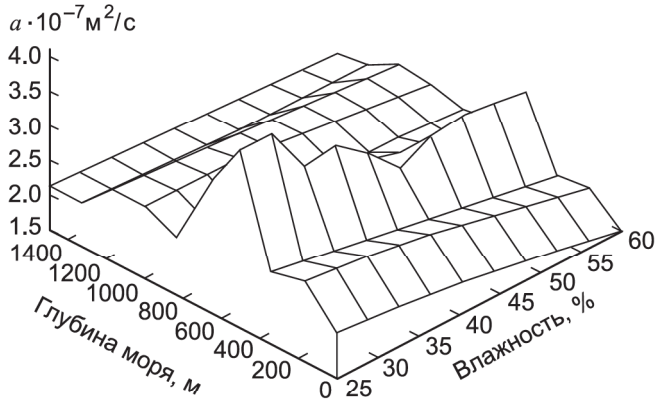

Рис. 1. Температуропроводность серых глинистых плейстоцен-голоценовых илов как функция их влажности и глубины моря

фациальных зон. На рис. 1 приведена зависимость температуропроводности осадков данного типа от их влажности и глубины моря для северозападной части данного района. Нетрудно видеть, что при одной и той же влажности осадки, сформировавшиеся на разных глубинах, имеют различные тепловые свойства. Наиболее низкие значения температуропроводности характеризуют шельфовую зону. Верхняя, примыкающая к шельфу часть континентального склона (граница между неритовой и собственно гемипелагической зонами осадконакопления) характеризуется максимальными значениями. Далее с глубиной температуропроводность меняется незначительно, придерживаясь величины, несколько превышающей аналогичную величину для шельфа. Полностью аналогичная картина наблюдается и для величины теплопроводности.

Теплопроводность донных осадков Черного моря (обобщение данных)

В интервале глубин от поверхности дна, представляющем интерес для геотермических исследований (0–3 м), донные отложения Черного моря имеют голоцен-плейстоценовый возраст. Верхний, голоценовый отдел данной толщи включает в себя два горизонта: современный (джеметинский), представленный зеленовато-серыми кокколитофоридовыми и серыми глинистыми и алевритистыми илами, и нижний древнечерноморский, содержащий глинистые (алевритистые) илы и (реже) сапропелевые и сапропелевидные илы, а также осадки, представляющие собой переслаивание глинистого и сапропелевого ила. Общая мощность отложений данного отдела меняется в весьма значительных пределах — от полного их отсутствия в некоторых районах континентального склона до многих метров в присклоновой части абиссали, где скорости осадконакопления особенно велики. Голоценовые осадки залегают на отложениях верхнего плейстоцена, представленных почти исключительно серыми, голубовато-серыми и буровато-серыми глинистыми илами с прослоями алевритового и (реже) песчаного материала. Характерные значения теплопроводности голоцен-плейстоценовых осадков по результатам наших исследований представлены в табл. 3.

Своего рода экзотикой для данной акватории являются сопочные брекчии, слагающие конусы подводных грязевых вулканов на абиссали, и паводковые отложения, разрывающие склоновые отложения голоценового возраста. Результаты определения их влажности и теплопроводности приводятся в табл. 4. В целом основные донные отложения Черного моря с некоторым упрощением можно разделить на три большие группы, каждая из которых будет рассмотрена нами отдельно.

Первая группа осадков — это серые глинистые и алевритистые илы, имеющие наибольшее распространение и характерные как для плейстоценовых, так и для голоценовых отложений. Влажность W этих илов колеблется в очень широких пределах — от 25 до 70%, а теплопроводность λ от 0.6 до 1.2 Вт/(м·К). Теплоемкость илов, не зависящая от структурных и текстурных особенностей, а также от дисперсности материала твердой фазы и очень незначительно меняющаяся с изменением минераль-

Таблица 3

Характерные значения теплопроводности донных осадков Черного моря голоцен-плейстоценового возраста

№	Слой	Характеристика отложений	Мощность, см	W, %	λ, Вт/(м·К)
1	Джеметинский	Глинистые и алевритовые илы, ракушечники	0–300	> 60	< 0.70
2	Каламитский	Сапропелевидные илы	0–50	55–80	0.65–0.80
3	Бугазско-Витязевский	Глинистые илы	0–100	25–60	0.60–1.20
4	Новоэвксинский	Глинистые и алевритовые илы	Вскрытая мощность до 150 см	25–60	0.60–1.20

Таблица 4

Характерные значения теплопроводности сопочных брекчий и паводковых отложений Черного моря

Возраст	Характеристика отложений	Вскрытая мощность, см	W, %	λ, Вт/(м·К)
Сопочные брекчии				
Древние каламитские отложения	Глинистый алеврит, богатый песком и гравием	до 90 см	33–40	0.88–0.92
Паводковые отложения				
Голоценовые отложения	Тонкие глинистые илы	до 50 см	55–60	0.65–0.71

ного каркаса, прекрасно укладывается в единую для всего рассматриваемого региона зависимость от влажности, представленную ранее приведенным соотношением (1). Напротив, тепло- и температуропроводность илов, как оказалось, значительно меняется при переходе от одной зоны осадконакопления к другой. Весьма существенные изменения теплопереносные свойства илов претерпевают и при переходе от одного географического района акватории к другому, что прежде всего связано, очевидно, с различиями в составе и дисперсности сносимого в море терригенного материала. Накопленные данные позволяют нам разделить акваторию Черного моря, где проводился отбор материала для исследований, по теплофизическим свойствам донных отложений на четыре района, схематически представленные на рис. 2. Каждой фациальной зоне из этих районов отвечает своя зависимость теплопроводности от влажности, которая действительно может быть аппроксимирована дробно-линейной функцией указанного типа. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены зависимости $\lambda(W)$ для серых глинистых илов западнокавказского и восточнокавказского районов (I и II на рис. 2).

Сводные результаты аппроксимации полученных нами зависимостей $\lambda(W)$ дробно-линейной функцией (2) для различных районов и фациальных зон Черного моря, иллюстрируются табл. 5. Как видно из этой таблицы, параметры A и B, оставаясь в среднем соответствующими значениям работы [6], изменяются в довольно широком диапазоне. При этом следует заметить, что результаты аппроксимации применимы только в том диапазоне влажности, на котором разбросаны исходные экспериментальные данные ($30 \div 60\%$). Действительно, все эти зависимости дают, например, в той или иной степени заниженные значения теплопроводности при близкой к 100% влажности (0.4–0.55 Вт/(м·К)), тогда как она должна быть близкой к теплопроводности воды (приблизительно 0.58 Вт/(м·К) при температурах около 20° С.

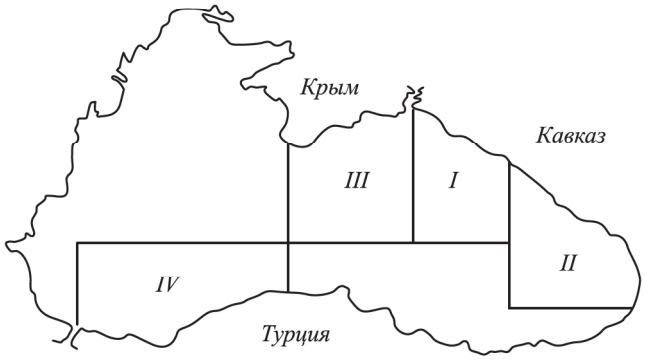

Рис. 2. Районирование акватории Черного моря по теплофизическим особенностям донных осадков: I — западнокавказский район, II — восточнокавказский район, III —центральный район, IV — южный район

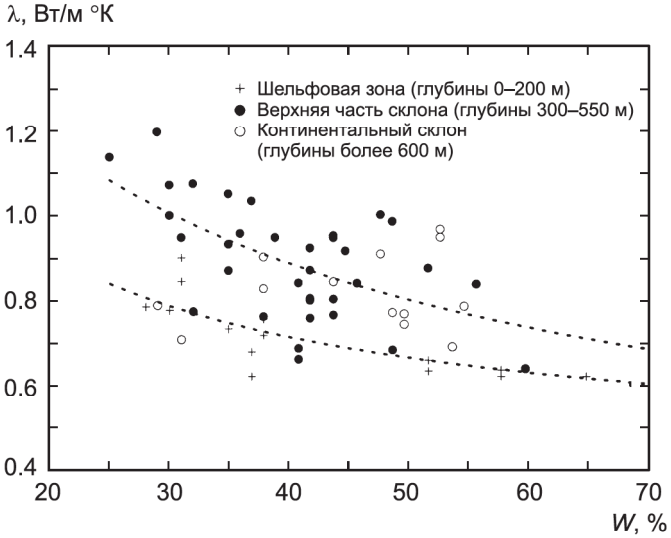

Рис. 3. Зависимость теплопроводности серых глинистых плейстоцен-голоценовых илов от влажности для западнокавказского района Черного моря. Верхняя кривая дает осреднение для верхней части склона, нижняя — для шельфа

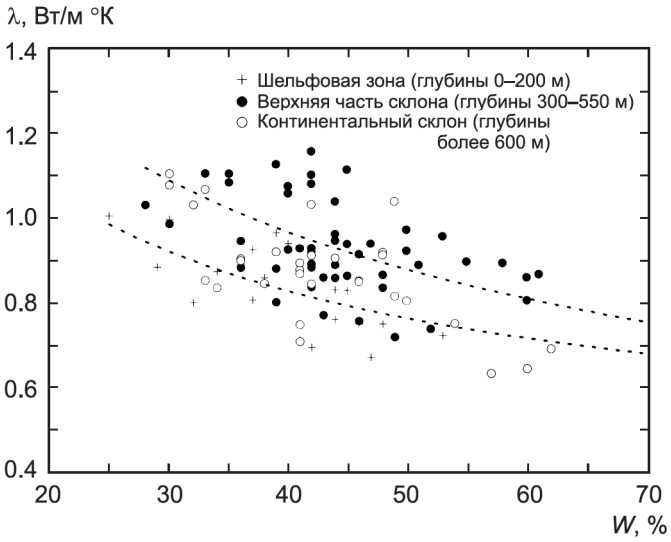

Рис. 4. Зависимость теплопроводности серых глинистых плейстоцен-голоценовых илов от влажности для восточнокавказского района Черного моря. Верхняя кривая дает осреднение для верхней части склона, нижняя — для шельфа

Вторая литологическая группа осадков — сапропелевые и сапропелевидные илы древнечерноморского (каламитского) возраста, характеризуемые повышенным содержанием органического вещества и имеющие более или менее значительное распространение только в центральном районе (III на рис. 2). Мощности данных отложений в этом регионе Черного моря в большинстве случаев невелики и меняются от нескольких сантиметров до 30–50 см. Влажность их, как правило, очень высока — 55–85%, теплопроводность, напротив, весьма неве-

Таблица 5

Аппроксимационные параметры зависимости $\lambda(W)$ для серых глинистых голоцен-плейстоценовых илов Черного моря

Регион	A	B
Шельф западнокавказского района	1.02	0.009
Шельф восточнокавказского района	0.84	0.009
Континентальный склон западнокавказского района	0.61	0.013
Континентальный склон восточнокавказского района	0.65	0.011
Шельф и континентальный склон южного района	0.38	0.015
Шельф и континентальный склон центрального района	0.36	0.019

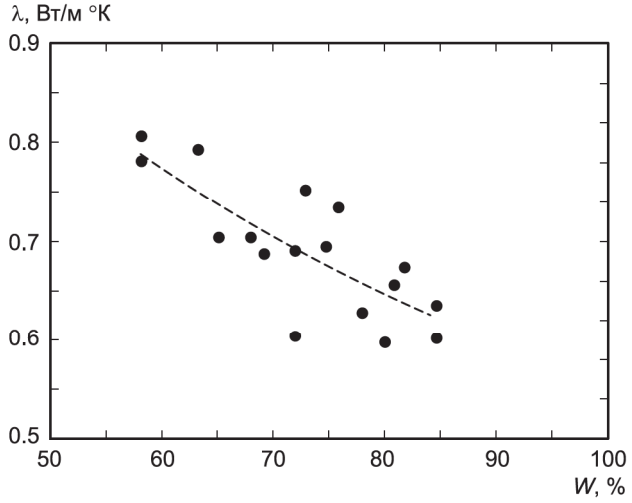

Рис. 5. Теплопроводность древнечерноморских сапропелевых илов как функция влажности

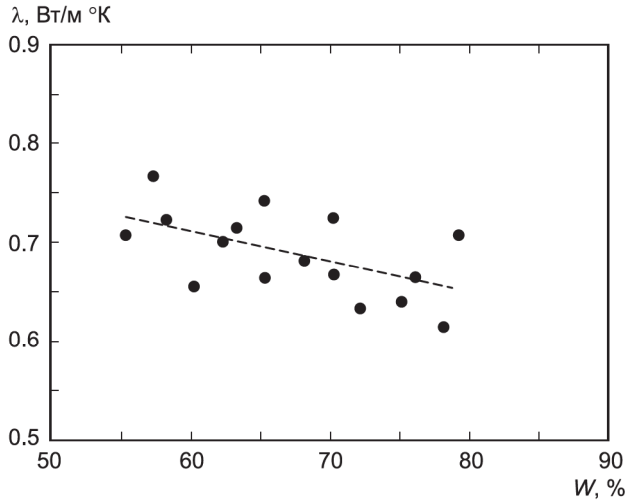

Рис. 6. Теплопроводность современных (джеметинских) кокколитофоридовых илов как функция влажности

лика и не превышает 0.85 Вт/(м·К). Данные по теплопроводности для осадков этой группы приведены на рис. 5. Аппроксимационные параметры: $A = 0.52$ и $B = 0.013$.

Третья группа — современные (джеметинские) кокколитофоридовые зеленовато-серые илы, также обладающие высокой (55–80%) влажностью и низкой (не выше 0.77 Вт/(м·К)) теплопроводностью. Мощность данных отложений не превышает в большинстве случаев 50–60 см. Данные по теплопроводности представлены на рис. 6. Аппроксимационные параметры: $A = 1.02$ и $B = 0.007$.

Таким образом, как нам представляется, при исследовании тонкой структуры теплового потока во внутренних морях, характеризующихся значительным разнообразием осадконакопления, необходимо непосредственное измерение теплопроводности осадков на базе измерения температурного градиента, а не использование усредненных аппроксимационных эмпирических соотношений $\lambda = \lambda(W)$ и тем более соотношений, полученных для океанических акваторий [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-05-65269).

Литература

1. *Хэнель Р.* // Тепловое поле Европы. М., 1982. С. 64.
2. *Bullard E.C.* // The sea / Ed. by M. N. Hill. III. N. Y., 1963. P. 128.
3. *Любимова Е.А., Александров Н.Л., Дучков А.Д.* Методика изучения тепловых потоков через дно океанов. М., 1973.
4. *Петрунин Г.И., Попов В.Г.* // Физика Земли. 1994. № 10. С. 78.
5. *Петрунин Г.И.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1981. **22**, № 4. С. 66.
6. *Дучков А.А., Казанцев С.А.* // Геофизические поля Атлантического океана. М., 1988. С. 121.
7. *Бойков А.М.* Нестационарные методы морской терморазведки. М., 1986.
8. *Radcliffe E.H.* // J. Geophys. Res. 1960. **65**, No. 5. P. 1535.

Поступила в редакцию
25.06.07