

*А. И. Свининников, Ю. Д. Марков, Е. П. Леликов,
Л. М. Грамм-Осипов*

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСАДКОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Изучение скорости звука, плотности и пористости в осадках, покрывающих дно Тихого океана к востоку от Курильских островов и Камчатки, показало, что эти характеристики зависят от генетического типа осадка и его гранулометрического состава. Выделены три провинции: 1) островной и материковый склоны, океанический борт желоба, 2) вал Зенкевича, Императорские горы и другие подводные возвышенности, 3) глубоководная котловина. Скорость звука в осадках глубоководной котловины ниже, чем в придонной

воде. Наличие прослоев вулканического пепла и горизонтов, обогащенных грубозернистым материалом, в тонких осадках вызывает увеличение скорости звука. В ряде случаев горизонты с повышенными значениями скорости звука прослеживаются на расстоянии 550—650 км. Величины скорости звука и плотности в железомарганцевых конкрециях выше таковых в пелитовых и алевроитово-пелитовых илах, с которыми они обычно ассоциируют. Это обстоятельство может быть использовано как поисковый критерий.

В последнее время при исследовании современного осадкообразования в морях и океанах большое внимание уделяется изучению физических свойств осадков. Такие исследования явились составной частью работ, выполненных Лабораторией геологических формаций морского дна и Лабораторией литологии ТОИ ДВНЦ АН СССР во время рейсов НИС «Каллисто» и «Первенец» в 1978—1981 гг., проходивших в центральной, северо-западной частях Тихого океана и окружающих морях.

Станции отбора проб располагались в районах с различными условиями осадкообразования. Пробы неконсолидированных четвертичных осадков отбирались с поверхности дна в интервале глубин 0—3 м прямоточными трубками и дночерпателями. Образцы железомарганцевых конкреций собраны дночерпателями и драгами. На борту судна при нормальных условиях ($P = 1$ атм, $T = 20^\circ\text{C}$) в них определялись плотность, влажность, пористость и скорость распространения продольных упругих колебаний (скорость звука). Гранулометрический анализ выполнялся в ПГО Приморгеология. Генетическая и гранулометрическая классификация осадков приведены по [2], а литолого-фациальные типы по [5].

Плотность определялась взвешиванием на технических весах проб осадков ненарушенной структуры и влажности объемом 50 см^3 [3], пористость (отношение объема пор к объему всего образца с естественной влажностью) — путем высушивания этих проб при температуре 105°C и последующего взвешивания. При вы-

числении пористости учитывалась соленость морской воды [6]. Скорость звука измерялась импульсным ультразвуковым способом прямого прозвучивания с помощью прибора УК-10П в направлениях, параллельном и перпендикулярном слоистости. Расстояние между точками опробования (измерения) составляло от 2 до 10 см в зависимости от однородности осадка.

В районах исследований изучены прибрежные, гемипелагические и пелагические осадки, а также железомарганцевые конкреции, обычно ассоциирующие с последним типом осадков. Прибрежные вулканомиктовые, терригенные, биогенные и пирокластические осадки присутствуют в пределах шельфа, материкового склона и склонов островных дуг. Они очень неоднородны по минеральному и гранулометрическому составу, по степени литификации, что определяется не только положением данного типа осадков в пределах шельфа, но и приуроченностью их к локальным поднятиям или впадинам, осложняющим рельеф шельфа. В целом осадки этой зоны отличаются значительным содержанием (до 50—75%) песчаных и алевроитовых частиц, присутствием включений гальки и щебня вулканических и метаморфических пород. Количество грубообломочного материала постепенно убывает с удалением от берега и минимально в средней части шельфа. Бровка шельфа и верхняя часть склона, где современное осадконакопление не происходит ввиду специфичной гидродинамической обстановки, покрыта слаболитифицированными реликтовыми песками. Физические свойства осадков этой зо-

ны очень изменчивы. Скорость звука меняется от 1820 м/с в грубозернистых песках до 1507 м/с в алевритистых глинах. Плотность и пористость по мере утончения слагающих осадок частиц изменяются от 2 г/см³ и 42% до 1,41 г/см³ и 74% соответственно.

Гемипелагические илы встречаются в виде локальных полей в зоне развития прибрежных осадков, но основной областью их распространения являются нижняя часть островного и материкового склонов, дно желоба и частично краевой вал ложа океана. Илы глинистые, серые с зеленым и голубым оттенками различной интенсивности, восстановленные, и лишь на поверхности наблюдается тонкий окисленный слой буро-коричневого цвета. Иногда встречаются погребенные в основной массе осадка прослойки бурого цвета. Гранулометрический состав илов более однороден по сравнению с прибрежными осадками. Песчаный и алевритовый материал встречается, главным образом, в виде прослоев мощностью до 10—15 см, в нижней части которых обычно присутствует гравий и щебень пемзы, мелкая галька разнообразных пород. Количество пелитовой фракции в гемипелагических илах достигает 80% и более. Величина скорости звука и плотности в прослоях алевритов с примесью песчаных частиц до 15—20% достигают значений 1612 м/с и 1,62 г/см³ и снижаются до 1500 м/с и 1,25 г/см³ в алеврито-пелитовых илах. Соответственно пористость возрастает с 59 до 86%.

Пелагические глины покрывают дно глубоководных котловин. В окраинных зонах распространения они сохраняют многие черты гемипелагических илов и называются переходными (миопелагическими) глинами. От гемипелагических илов они отличаются сменой восстановительных условий на окислительные, что внешне проявляется в желто-буром, светло-коричневом, кирпично-красном и серо-коричневом цвете отложений. Содержание пелитовой фракции составляет более 80%. Терригенная примесь алевритовой и песчаной размерности незначительна. В трехметровой поверхностной толще миопелагических глин присутствует от одного до трех прослоев светло-серого пепла мощностью от 1—7 до 25 см. Встречаются также рассеянные частицы пепла. В основаниях прослоев часты скопления обломков пемзы.

По данным [4], содержание пирокластиков песчано-алевритовой размерности на осадок в целом в среднем составляет немногим более 4%. Наличие прослоев и участков, обогащенных пирокластикой, в гемипелагических и миопелагических илах станций 25, 30 и 40. Звук фиксируется увеличением скорости звука на этих горизонтах (рис. 1). Расстояние между станциями 550—650 км.

Во внутренних областях котловин глины пе-

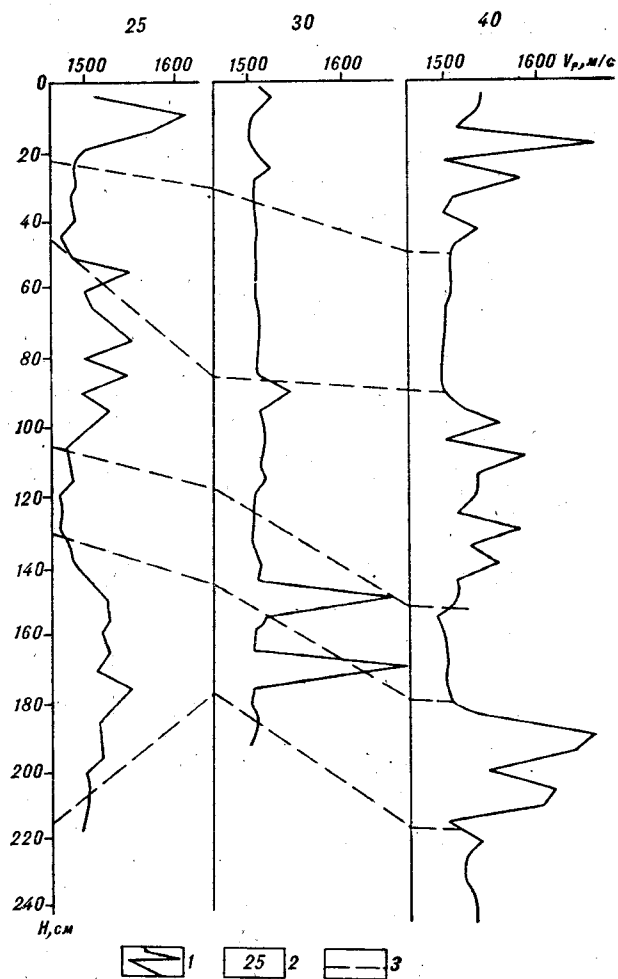


Рис. 1. Изменение скорости звука (V_p) в колонках осадков и их корреляция.

1 — диаграмма изменения измеренных значений скорости звука вдоль керна осадка; 2 — номер станции; 3 — предполагаемые границы коррелируемых слоев. H — глубина колонки (длина керна).

редного типа постепенно сменяются типичными пелагическими (эмпелагическими) «красными» глинами, представляющими собой однородные окисленные пелитовые илы темно-коричневого цвета. Красные глины практически бескарбонатны, на 80—98% сложены частицами пелитовой размерности, в поверхностном слое содержат черные железомарганцевые конкреции.

Значения скорости звука, плотности и пористости в пелагических осадках отличаются однообразием. Скорость звука изменяется от 1518 м/с в осадках переходного типа до 1480 м/с в эмпелагических глинах и обычно ниже скорости в придонной воде. Плотность имеет значения 1,35—1,43 г/см³, пористость изменяется в интервале 76—96%. Прослойки вулканического пепла, характерные для осадков переходного типа, имеют более высокие значения скорости

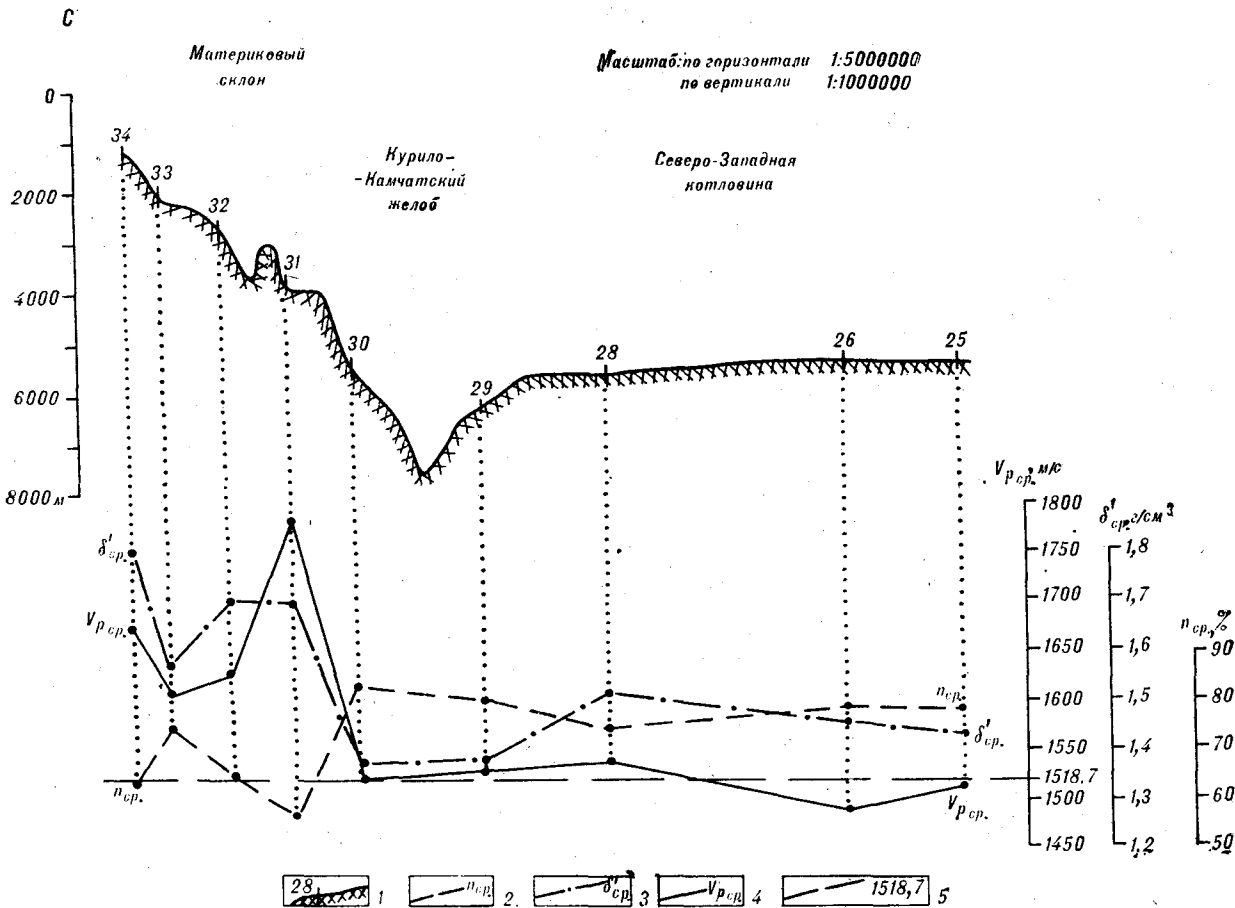


Рис. 2. Изменение физических свойств осадков по профилю, пересекающему материковый (островной) склон, желоб и глубоководную котловину.

1 — поверхность дна и номер станции отбора осадков; 2—4 — средние значения измеренных свойств: 2 — пористость, 3 — плотность, 4 — скорость звука; 5 — величина скорости звука в морской воде нормальной солености при лабораторных условиях.

($V_{р.ср.} = 1572$ м/с) и плотности ($\delta_{ср.} = 1,55$ г/см³) и более низкую пористость ($n_{ср.} = 73\%$).

Железомарганцевые конкреции залегают преимущественно в верхнем слое осадков мощностью от 1—3 до 10—20 см. Основными областями их распространения являются глубоководные районы пелагической седиментации с низкой скоростью осадконакопления. Степень покрытия дна конкрециями, по данным [1], изменяется даже в пределах главных рудоносных полей от 0 до 90—100%. Физические характеристики конкреций (плотность, скорость звука, удельный вес) испытывают значительные колебания, отражая, главным образом, содержание рудного компонента. Плотность изменяется в интервале 1,57—2,42 г/см³, скорость звука варьирует от 1622 до 2922 м/с, удельный вес (γ) находится в пределах 2,90—3,46 г/см³. Средние значения, рассчитанные из 36 измерений этих характеристик, следующие: $\delta_{ср.} = 1,95$ г/см³, $V_{р.ср.} = 2065$ м/с, $\gamma_{ср.} = 3,175$ г/см³.

Средние значения скорости звука, плотности, пористости, рассчитанные для каждой колонки осадка по профилю (рис. 2), пересекающему описанные литофациальные зоны, испытывают закономерные изменения: с удалением от континента скорость звука и плотность убывают, а пористость растет. Эта общая тенденция проявляется на фоне локальных аномалий, обусловленных расчлененным рельефом дна.

Возможность прогнозирования физических свойств литологически изученных разрезов, распространение полученных значений на области предыдущих геологических исследований, не сопровождавшихся изучением физических свойств, обуславливает интерес к оценке последних в каждом типе осадка. Скорость звука, плотность и пористость некоторых из исследованных разностей представлена в таблице. Зависимость плотности от пористости (рис. 3, а) имеет линейный характер, незначительные отклонения связаны с вариациями удельного веса осадка. Сплошными прямыми линиями на

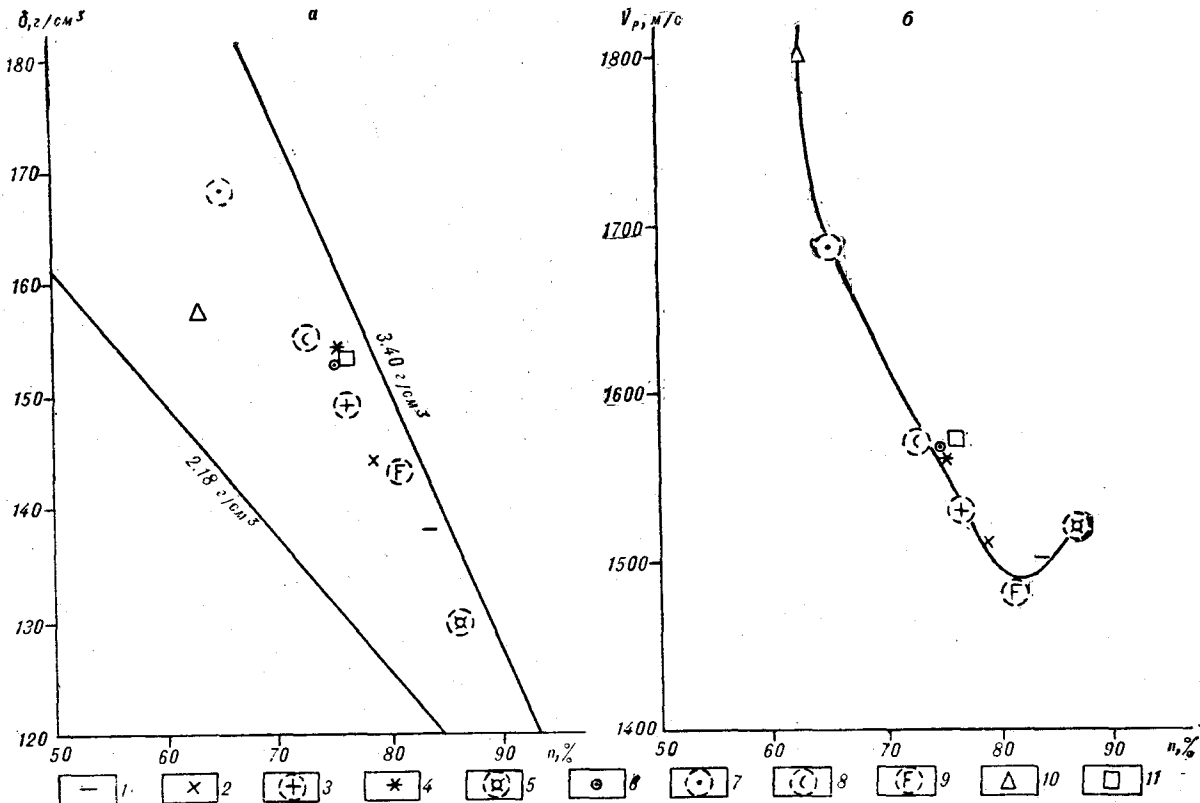


Рис. 3. Средние значения пористости и плотности (а), скорости звука и пористости (б) в осадках северо-западной части Тихого океана (в зоне влияния активного вулканизма).

Типы осадков: 1 — пелитовый ил, 2 — алевроитово-пелитовый ил, 3 — мелкоалевритовый ил, 4 — крупный алевроит, 5 — ил кремнистый, 6 — ил с включениями гальки и гравия, 7 — песок, 8 — вулканический пепел, 9 — ил железистый, 10 — щебень пемзы и др. вулканических пород, 11 — ил слабоизвестковый.

рисунке показана зависимость плотности от пористости, полученная из уравнения:

$$\delta = \gamma - (\gamma - \delta_b)n,$$

где ρ плотность осадка, γ — плотность твердой фазы (удельный вес) осадка, n — пористость осадка, ρ_b — плотность порового флюида.

Максимальное и минимальное значения удельного веса для осадков приняты 2,18 и 3,40 г/см³, плотность воды считается равной 1,03 г/см³. Скорость звука зависит от различных факторов (плотности осадка, содержания песчаной, гравийной и галечной фракций, количества CaCO₃, SiO₂ и окислов железа), но наиболее сильно проявляется связь скорости с пористостью осадка и содержанием в нем пелитовой фракции. Линия, описывающая зависимость скорости звука от пористости (см. рис. 3, б), близка к параболе и аппроксимируется уравнением полиномиальной регрессии третьей степени. Кривая скорости при увеличении пористости (уменьшении размера слагающих осадок частиц) сначала резко, а затем более полого снижается, но при значениях пористости около 82% наблюдается перегиб и скорость несколько возрастает. Минимальные значения

Физические свойства некоторых типов осадков северо-западной части Тихого океана (зоны влияния активного вулканизма и распространения кремнистых илов)*

Тип осадка	N, шт.	Плотность		Пористость		Скорость		S, %
		г/см ³		%		м/с		
		δ	σ_n	n	σ_n	V_p	σ_n	
Песок мелкозернистый	2	1,68	—	65,3	—	1686	—	38,1
Алеврит мелкий	18	1,51	0,09	74,7	6,44	1548	38,2	55,3
Алевроитово-пелитовый ил	149	1,44	0,07	78,5	6,95	1511	24,5	67,0
Пелитовый ил	105	1,37	0,06	83,1	4,75	1495	16,2	76,5
Диатомовый ил	2	1,26	—	89,9	—	1524	—	57,5
Пепловые прослойки	18	1,61	0,13	68,4	8,04	1693	95,8	37,8
Красная глубоководная глина	49	1,33	0,04	81,5	3,15	1474	11,5	78,2

* N — число проанализированных проб, δ — плотность (объемный вес) осадков с естественной влажностью, n — пористость (вычислена с учетом солёности порового флюида), V_p — скорость звука (измерена при P 1 атм и t 20°C в осадках с естественной влажностью), σ_n — стандартное отклонение, S — содержание пелитовой (менее 0,01 мм) фракции.

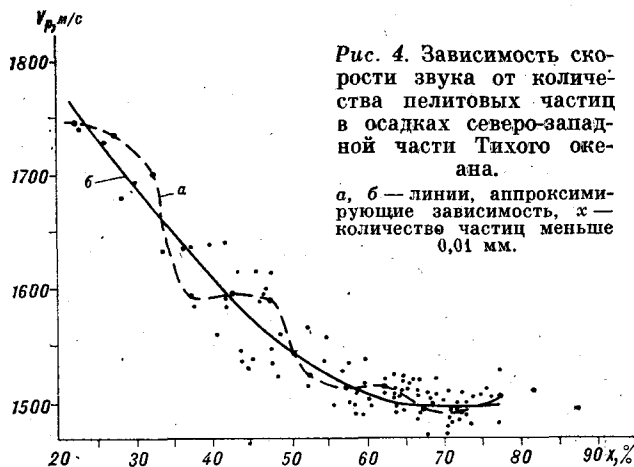


Рис. 4. Зависимость скорости звука от количества пелитовых частиц в осадках северо-западной части Тихого океана.

а, б — линии, аппроксимирующие зависимость, х — количество частиц меньше 0,01 мм.

чения характерны для пелитовых илов с повышенным (>5%) содержанием трехоксида железа. Небольшое повышение скорости звука при дальнейшем (>82%) увеличении пористости наблюдается на фоне роста содержания аморфного кремнезема в диатомовых илах. Скорость звука уменьшается с ростом содержания в осадках пелитовой фракции (рис. 4). Эта связь может быть использована для предсказания скорости в терригенных, акустически изотропных поверхностных осадках морского дна и в пелагических глинах. Отклонение рассчитанных с помощью установленной зависимости значений скорости от экспериментальных в большинстве случаев не превышает 5%.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

1. Для исследованных пелитовых и алевроитово-пелитовых илов характерны скорости более низкие, чем в морской воде нормальной солености. Наличие низкоскоростного слоя (звукового канала) в поверхностной толще осадков дна, по-видимому, необходимо учитывать при постановке морских сейсмических работ и интерпретации полученных результатов.

2. Генетический тип осадков и гранулометрический состав являются основными факторами, влияющими на скорость распространения звука в рыхлых осадочных образованиях, на их пористость и плотность. Это даёт возможность прогнозировать физические свойства осадков по результатам выполненных в регионе литологических исследований.

3. Наличие в поверхностном трехметровом слое гемипелагических осадков и глин переходного типа северо-западной части Тихого океана горизонтов, обогащенных пирокластикой и пемзой, их выдержанность по простиранию и повышенные значения скорости звука в пределах этих горизонтов позволяют в некоторых случаях проводить корреляцию разрезов отдельных, отстоящих на расстоянии до 550—650 км друг от друга станций физическими методами и предполагать наличие акустической квазианизотропии осадков этой зоны.

4. Значения скорости и плотности в железомарганцевых конкрециях ($V_{p\text{cp}} = 2065$ м/с, $\delta_{\text{cp}} = 1,95$ г/см³) выше таковых в пелитовых и алевроитово-пелитовых илах ($V_{p\text{cp}} = 1480$ м/с, $\delta_{\text{cp}} = 1,4$ г/см³), с которыми они обычно ассоциируют, что может быть использовано как поисковый критерий для обнаружения полей развития конкреций и оценки их продуктивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безруков П. Л. Железомарганцевые конкреционные руды.— В кн.: Океанология. Геология океана. Осадкообразование и магматизм океана. М.: Наука, 1979.
2. Безруков П. Л., Лисицын А. П. Классификация осадков современных морских водоемов.— Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 1960, т. 32.
3. Кобранова В. Н., Извеков Б. И. и др. Определение петрофизических характеристик по образцам. М.: Недра, 1977.
4. Репечка М. А. Влияние пирокластического материала

на осадконакопление в Японском море и в северо-западной части Тихого океана.— ДАН СССР, 1971, т. 199, № 4.

5. Скорнякова Н. С., Мурдма И. О. и др. О фациальной изменчивости глубоководных пелагических осадков Тихого океана.— В кн.: История Мирового океана. М.: Наука, 1971.
6. Hamilton E. L. Prediction of in Situ Acoustic and Elastic Properties of Marine Sediments.— Geophysics, 1971, v. 36.

ТОИ ДВНЦ АН СССР
Владивосток

Поступила в редакцию
22 февраля 1983 г.