Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
1986, т. 109

УДК 624.131.1:553(26)

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ОБЛАСТЕЙ ОКЕАНА

Я.В.НЕИЗВЕСТНОВ

Известные на сегодняшний день месторождения твердых полезных ископаемых глубоководных областей океана связаны со скоплениями железомарганцевых конкреций. Всего выделено 14 полей конкреций, площадью до нескольких миллионов квадратных километров, половина их располагается в Тихом океане. Поля конкреций вместе с более мелкими конкрециеносными площадями образуют два приэкваториальных пояса. Судя по зарубежным геолого-экономическим оценкам, наибольший промышленный интерес представляет конкреционная зона восточной части Тихого океана, расположенная к северу от экватора и включающая в себя поля Кларион-Клиппертон и Центрально-Тихоокеанское. Американская корпорация "Дипси-Венчурс" в 1974 г. подала официальную заявку на открытие первого месторождения конкреций в районе разлома Кларион, в восточной части рассматриваемого пояса [2].

Характерной чертой месторождений железомарганцевых конкреций является распространение полезного компонента на поверхности дна и в тонком приповерхностном слое осадков на тысячах квадратных километров при средней глубине океана около 5000 м.

Проблемы, возникающие при планировании инженерно-геологического изучения месторождений конкреций, связаны, во-первых, со специфичностью предмета исследований - элементов инженерно-геологических условий глубоководных областей океана, во-вторых, с особенностями объекта исследований. Здесь мы остановимся только на первой группе проблем.

Основными элементами инженерно-геологических условий являются состав, состояние горных пород и донных осадков, условия их залегания, положение в рельефе, физико-механические свойства, состав, состояние и свойства поровых и подземных вод, геологические процессы и явления, рассматриваемые с позиций взаимодействия с инженерными сооружениями и механизмами [5].

На конкрециеносных площадях дно океана сложено осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями позднемеловой-четвертичного возраста, залегающими на базальтовом ложе. Мощность чехла составляет чаще всего сотни метров, изредка, в центральной части океана, превышает тысячу метров, вблизи некоторых крупных положительных морфоструктур океанского дна (например, Восточно-Тихоокеанское поднятие) уменьшается до нескольких десятков мет-

ров и даже нескольких метров. Осадочные образования по своему генезису и литологическому составу относятся к трем основным типам: полигенным глинистым, биогенным кремнистым и карбонатным. Наряду с этим широко развиты и смешанные литологические типы (глинисто-кремнистые, карбонатно-глинистые и т.п.). Для гранулометрического состава осадков, вмещающих железомарганцевые конкреции, характерно преобладание глинистых фракций. Так, по данным 95 определений японских исследователей в Центрально-Тихоокеанском поле, минимальное содержание фракций мельче 2 мкм для четвертичных глинистых осадков составляют 59–82 %, пылеватых фракций 2–4 %, песчаных 0–3 %. Максимальное содержание этих же фракций соответственно составляет 73–96, 10–28 и 9–30 %. В четвертичных кремнистых осадках содержание глинистых, пылеватых и песчаных фракций составляет соответственно 75–91, 2–13 и 5–19 %.

В четвертичных карбонатных илах содержание глинистых, пылеватых и песчаных частиц равно 45–85, 0–40 и 15–37 % [9]. По данным 13 определений верхнеолигоценово-миоценовые глины и миоцен-четвертичные глинистые осадки поля Кларион-Клиппертон характеризуются содержанием фракции мельче 2 мкм соответственно 48–77 и 38–65 %. Для некоторых разностей глинистых отложений района Кларион-Клиппертон отмечено преобладание содержания пылеватых частиц над глинистыми [3]. В то же время пределы пластичности глинистых донных осадков, различных по гранулометрическому составу, мало отличаются. Так, число пластичности, по данным нескольких десятков определений, для четвертичных глинистых отложений Центрально-Тихоокеанского поля составляет 0,30–1,83, для глинистых кайнозойских отложений района Кларион-Клиппертон 0,68–1,24 [3]. Верхний предел пластичности соответственно 1,30–2,60 и 1,35–2,48. Близки и показатели других физико-механических свойств для осадков одного литологического типа и разного гранулометрического состава. При этом минеральный состав глинистых фракций донных осадков района одинаков для всех рассматриваемых конкрециеносных полей с содержанием монтмориллонита в среднем около 30 % и гидрослюды около 40 % [9,16].

Высокая пористость осадков, достигающая 0,88–0,92, свидетельствует об их сложном микроагрегатном сложении. Размер микроагрегатов в глинистых и глинисто-кремнистых осадках, по определению Л.А.Чайки, достигает 0,1 мм. В морской воде агрегаты практически не поддаются механическому разрушению. В результате этого взмучиваемость даже самых тонкодисперсных осадков незначительна, а осаждение взмученных частиц проходит весьма интенсивно, со скоростью до нескольких метров в сутки. Даже при анализе гранулометрического состава в дистиллированной воде с применением пирофосфата натрия не всегда удается достичь полного разрушения всех агрегатов, что, видимо, объясняет различия в гранулометрическом составе осадков, идентичных по своему минералогическому составу и физическим свойствам.

Характерной особенностью состояния осадков и отложений чехла абиссальных котловин является весьма слабая их уплотненность при полной водонасыщенности. Плотность наиболее распространенных в приповерхностном слое полей Кларион-Клиппертон и Центрально-Тихоокеанском четвертичных

глинистых и кремнистых осадков изменяется от I,I0 до I,28 г/см^3 при пористости 0,84–0,92 и влажности I,I8–5,76 [3,9]. Несколько большей плотностью (I,I9–I,55 г/см^3) в приповерхностных слоях обладают карбонатные осадки, залегающие выше уровня карбонатной компенсации [9]. В верхнем слое толщиной 2–3 м плотность кремнистых и глинистых осадков остается практически постоянной.

При рассмотрении уплотняемости однородных по составу осадков широкого стратиграфического диапазона в интервале 0–200 м по скважинам глубоководного бурения установлено, что карбонатные и глинистые литологические типы уплотняются с глубиной, хотя и значительно менее интенсивно, чем на континентальных платформах. Средние значения плотности глинистых и карбонатных осадков различного возраста на глубине 200 м не превышают I,70–I,75 г/см^3 [II,I2].

Наихудшая уплотняемость характерна для кремнистых осадков. Так, в Южно-Тихоокеанском поле по скважине 65 глубоководного бурения плотность четвертичных, плиоценовых и среднемиоценовых кремнистых осадков в интервале I0–20 м сохранилась равной I,I0 г/см^3. На глубине 65 м плотность скачкообразно увеличилась до I,20 г/см^3, оставаясь практически постоянной ниже по разрезу до глубины I20 м. Аналогичный характер изменения плотности с глубиной отмечен для палеогеновых глинисто-кремнистых отложений, вскрытых скважиной глубоководного бурения I63а [I2].

Некоторые исследователи рассматривают недоуплотненность осадков как парадокс океанского литогенеза [4,6], состоящий в несоответствии давлений в осадочной толще на дне океана и степенью ее уплотненности. Однако с инженерно-геологических позиций (теория фильтрационной консолидации) это явление может быть объяснено. Анализ упомянутых выше разрезов скважин глубоководного бурения, по которым отмечалось отсутствие уплотнения осадков с глубиной, показывает, что гидравлический градиент, в водонасыщенных толщах достигающий 0,05–0,I0, недостаточен для фильтрационного отжатия воды. Лабораторные эксперименты по определению начального градиента по образцам нарушенного сложения осадков верхней части разреза, выполненные В.М.Бевзюком и Н.П.Тестовой, не позволяют пока установить его величину достаточно уверенно.

Проблема экспериментального определения начального градиента фильтрации важна для прогноза деформационного поведения осадков. Сложность ее решения усугубляется необходимостью проведения опытов при термобарических условиях дна океана, характеризующихся давлениями свыше 50 МПа и температурами около 0 °С. В этих условиях толщина пленок физически связанной воды должна быть существенно выше, чем при производстве опытов в лаборатории. Процессы диагенеза в неуплотняющейся толще осадков (что в наибольшей степени относится к их кремнистым разновидностям) проявляются в формировании жестких необратимых связей, отражающихся на прочностных и на тиксотропных свойствах.

Так, прочность на сдвиг приповерхностного слоя миоцен-четвертичных осадков поля Кларион-Клиппертон составляет I,7–7,6 кПа при плотности I,22–I,27 г/см^3 [7,3]. Прочность на сдвиг эоценовых кремнистых осадков

такой же плотности, вскрытых в этом районе скважиной I63, на глубине 57 и I50 м, составляла соответственно 27,2 и 64 7 кПа [I2].

Исследование тиксотропных свойств осадков различного возраста показывает, что прочность четвертичных осадков формируется в основном за счет коагуляционных легковосстанавливаемых связей, а прочность более древних осадков в значительной степени обусловлена цементационными связями, не восстанавливающимися при разрушении [3].

Коэффициент относительного структурного упрочнения, определяемый через шесть суток и отражающий степень восстановления нарушенных структурных связей, для миоцен-четвертичных осадков равен 0,73, для палеогеновых карбонатно-глинистых отложений 0,I7. Слабую уплотняемость осадков, образующих осадочный чехол океанских котловин, нельзя рассматривать как физический парадокс из-за ее несхожести с состоянием отложений чехла континентальных платформ. Состояние океанских осадков, вещественный и зерновой состав закономерно отражают условия их формирования в специфической термобарической обстановке океанских котловин, существенно отличающейся от приконтинентальной.

Различные условия формирования осадочных толщ не позволяют распространять инженерно-геологические закономерности, выявленные для подводных и надводных областей континентов, на глубоководные океанские котловины. Это относится к расчетным схемам взаимодействия донных осадков с сооружениями и механизмами и к выбору основных расчетных параметров и методикам их определения.

Принципиальное отличие расчетных схем взаимодействия сооружений и механизмов с донными осадками в пределах подводных месторождений железомарганцевых конкреций от схем, разработанных для континентов, определяются тем, что донные осадки приповерхностных слоев по своим свойствам во многом близки неньютоновской жидкости. Влажность наиболее распространенных на конкрециеносных площадях четвертичных глинистых и кремнистых осадков достигает 9I-92 %. Плотность их несколько превышает плотность морской воды, составляя в среднем около I,2 г/см^3. Прочность осадков приповерхностного слоя на сдвиг также невелика: 0,9-7,6 кПа по данным около 200 определений методом вращательного среза на борту судна [9,3]. Деформационные свойства этих осадков (коэффициент поперечной деформации - коэффициент Пуассона равен 0,5 [I3,8]), таковы, что деформация илов может происходить как у жидкого тела, т.е. без изменения объема. Это значит, что для илов характерны деформации течения. Деформационное поведение илов изучалось на вискозиметрах. Судя по полученным реологическим кривым, деформация илов происходит с резким разрушением сложения [3].

Так как в самое ближайшее время решение инженерно-геологических задач на месторождениях железомарганцевых конкреций станет практически необходимым, в первую очередь нужно стандартизировать методику определения основных параметров физико-механических свойств осадков с учетом их особенностей и характера требуемых расчетов.

Массовому определению физических свойств осадков с необходимой точ-

ностью способствует весьма слабая газоносность осадков в пределах рассматриваемых полей конкреций, что пока установлено визуально при небольшом объеме специальных исследований [I4]. Пренебрежимо малое содержание газов позволяет рассматривать глубоководные осадки как двухфазную систему, для получения основных физических характеристик которой достаточно двух показателей: плотности и влажности с последующим расчетом плотности скелета и пористости (равной объемной влажности). Разуплотнение осадка за счет упругих свойств воды при подъеме пробы на борт с глубины 5000 м не превышает 2-2,2 % [I,I2], поэтому определение плотности осадка по стандартной методике режущего кольца должно быть достаточно точным. При выборе расчетного значения плотности важно также решить вопрос о полном или частичном учете архимедовых сил при расчетах несущей способности, устойчивости склонов и т.п.

Несколько сложнее решить вопрос о правомерности применения в этих условиях методики для определения влажности, так как при пористости, превышающей 80-90 % и минерализации воды, насыщающей поры, более 30-35 г/кг, масса солей, образующихся при выпаривании, становится соизмеримой с массой скелета осадка, что увеличивает ошибки в расчетах влажности до I0-I5 % и выше. Следует согласиться с предложением Международного совещания по стандартизации морских исследований [I0] принимать за влажность осадка (породы) частное от деления суммы масс выпаренной воды и растворенных в воде солей на разность масс твердой фазы осадка и солей, выпавших в сухой остаток из порового раствора.

Основным методом определения прочностных свойств глубоководных осадков, широко используемым в практике инженерно-геологических исследований, является вращательный срез по неконсолидированной и недренированной схеме испытаний [I0,I5]. При этом для глинистых и других, обладающих такими же физическими свойствами, осадков принимается, что угол внутреннего трения равен нулю, а сопротивление сдвигу равно удельному сцеплению [I4]. Несмотря на некоторую условность этого допущения оно достаточно широко и успешно применяется для практических расчетов [I0].

Для расчета взаимодействия илов с перемещающимися по их поверхности механизмами, динамически воздействующими на дно, используется понятие остаточной прочности [I5], соответствующее обычно минимальному значению крутящего момента при опытах по вращательному срезу. Однако вопрос об остаточной прочности илов, зависящей от интенсивности воздействия механизмов на дно и тиксотропных свойств донного осадка, изучен весьма слабо и требует, по нашему мнению, тщательного исследования в самое ближайшее время.

Не менее остро стоит проблема прогноза деформационного поведения глубоководных осадков (течения, фильтрационной консолидации), решение которой позволит обосновать перечень необходимых параметров деформационных и реологических свойств и методику их определения.

Специфической является проблема прилипаемости механизмов ко дну. Прилипаемость, во-первых, определяется поверхностными силами - адгезией. Величину ее относительно несложно установить экспериментально, определяя

липкость применительно к различным поверхностям. Методика определения липкости, разработанная в основном для дорожного строительства, требует пересмотра применительно к условиям океанского дна. Кроме того, прилипаемость ко дну может происходить за счет присасывания, обусловленного тем, что гидростатическое давление на верхнюю поверхность предмета не компенсируется давлением на его нижнюю поверхность при плотном контакте с океанским дном. В случаях, когда донная поверхность сложена слабыми четвертичными осадками, обладающими свойствами жидкости, присасывание, видимо, не должно иметь места. Однако на участках выхода на донную поверхность древних, более консолидированных отложений, опасность весьма прочного присасывания различных предметов должна быть учтена. Теоретическое и экспериментальное изучение процессов присасывания является актуальной проблемой инженерной геологии океанских месторождений конкреций.

В заключение необходимо отметить, что вопрос формирования физико-механических свойств океанских осадков не может быть решен без изучения физики поровых вод, составляющих преобладающую по своему объему и массе часть осадков. Поровые воды должны также изучаться с позиций оценки коррозионной активности среды.

Изучение физико-механических свойств донных осадков и отложений позволит прогнозировать гравитационные и другие геологические процессы, которые могут осложнить освоение подводных месторождений конкреций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабинец А.Е., Емельянов А.Ю., Митропольский А.Ю. и др. Физико-механические свойства донных осадков Черного моря. Киев, Наукова думка, 1981.

2. Егиазаров Б.Х., Андреев С.И., Айпемер А.И. Глубоководное океанское рудообразование, проблемы и пути их решения. – В кн.: Проблемы изучения и освоения минеральных ресурсов Мирового океана. Л., изд. ПГО "Севморгеология", 1984.

3. Иванов В.Н., Кондратенко А.В. Инженерно-геологические условия района Кларион-Клиппертон. – В кн.: Кайнозойское морское осадконакопление и рудогенез. Л., изд. ПГО "Севморгеология", 1984.

4. Левитан М.А. Некоторые особенности постседиментационных преобразований океанских отложений. – Литология и полезные ископаемые, 1979, № 5.

5. Неизвестнов Я.В. Методологические основы изучения инженерной геологии арктических шельфов СССР. – Инженерная геология, 1982, № 1.

6. Соколов Б.А., Конюхов А.И. Специфика диагенеза глубоководных котловин. – В кн.: Комплексные исследования природы океана. М., изд-во МГУ, 1980. Вып. 7.

7. Bischoff J.L., Piper D.S. Marine geology and oceanography of the Pacific manganese noduli province. N.Y.-London, 1979.

8. Davie V.R., Fenske C.W., Serocki S.T. – Marine Geotechhology, 1978, vol 3, N 1.

9. Deep-Sea Mineral Resourses Jnvestigation in the Central-Western Part of Central Pacific Basin. Kawosaki, 1979.

10. Deep-Sea Sediments. Physical and Mechanical Properties. N.J.-London, 1974.

11. H a m i l t o n E.L. - Jorn of Sediment Petrology, 1976, vol. 46.

12. Jnitial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington, 1970-1976. Vol. 5,7,8,16,17,19,20,21,32,33.

13. K r e t s c h m e r T.R., L e e H.J. - Tech. Rep., R-694, 1970.

14. R i c h a r d s A.F., C h a n e y R.C. - Marine Mining, 1981, vol. 2.

15. Natural Gases in Marine Sediments. N.J.-London, 1974.

16. T i s o t J.R., G e r a r d B. - Offshore Technology Conference, 1981, vol. 4.