

Ю.Г.Юровский

*Крымское отделение Украинского государственного
геологоразведочного института, г.Симферополь***ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЯЖЕЙ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ**

Формирование пляжей северо-западного побережья Азовского моря имеет ряд особенностей. В волноприбойной зоне происходит разделение тяжелой и легкой фракции с образованием слоев «черных песков». Рассматривается механизм образования слоев и их вещественный состав. В ассоциациях минералов тяжелой фракции наблюдается резкое повышение естественного радиоактивного фона. Повышение радиоактивного фона вызывается концентрацией уран и торий содержащих минералов. Это обстоятельство негативно сказывается на рекреационном потенциале азовских пляжей.

Морфологии побережья на северо-западе Азовского моря присущ своеобразный облик. Оно представлено абразионно-аккумулятивными берегами в виде чередования кос так называемого Азовского типа, разделенных широкими заливами. Аккумулятивные образования чередуются с активно абрадируемыми клифами высотой от 5 – 7 до 25 – 30 м. Кроме абразионных процессов, в приморской зоне широко развиты оползни, речная и балочная эрозия. Становление морехозяйственного и рекреационного комплексов нуждаются в научном подходе, изучении естественных процессов и негативных следствий, вызванных антропогенным влиянием.

В формировании современных морфологических черт побережья главную роль играет волновое воздействие. Изучению его в 70 – 80-х гг. прошлого века уделялось достаточно много внимания [1 – 4 и др.]. Однако, ввиду объективных причин, последние 20 лет серьезных исследований не проводилось. Представляется целесообразным хотя бы частично восполнить этот пробел, используя результаты предшествующих работ и собственных наблюдений в 2000 – 2004 гг. на участке побережья от г.Бердянска до г.Мариуполя.

Гидрометеорологический режим. Согласно справочным данным (гидрометеорологические ежегодники и кадастры) на рассматриваемом участке побережья наиболее часты ветры восточного направления (45 – 50 %), далее следуют ветры западных румбов (35 – 40 %). Причем в холодную половину года преобладают ветры восточного направления, в теплую – западного. Штилевые периоды для Азовского моря скорее исключение, чем правило: повторяемость штилей составляет всего 3 – 6 %. Специалисты отмечают, что циркуляция воздушных масс в последние 10 – 15 лет существенно изменилась за счет появления ранее чрезвычайно редких циклонических образований над Черным морем и восточной частью Средиземного.

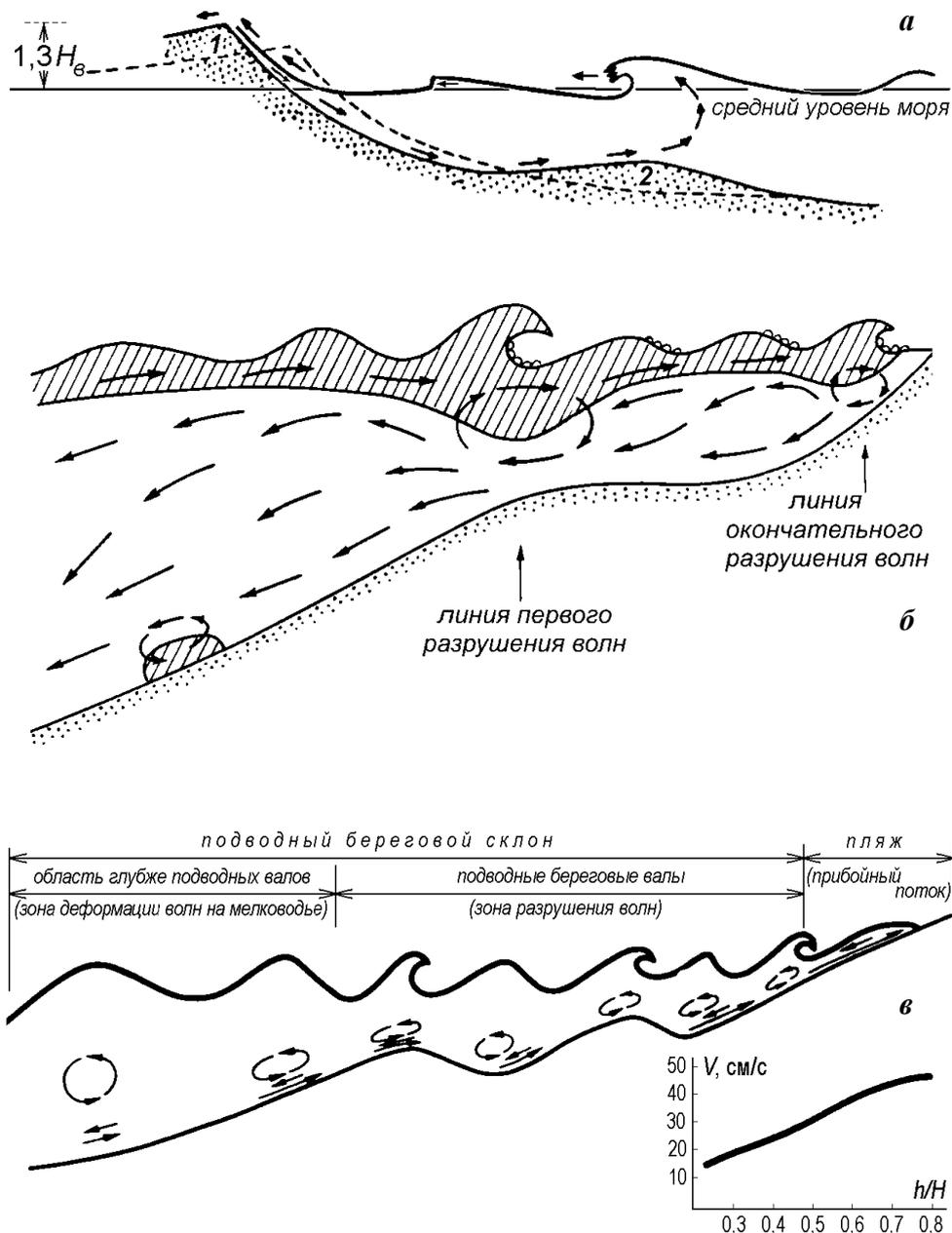
В зависимости от направления ветра по отношению к береговой линии возникают сгонные или нагонные изменения уровня моря. Величина сгонно-нагонных изменений уровня составляет 412 см для г.Геничск, 199 см

для г.Бердянск и 242 см для г.Мариуполь. Максимальные уровни вызывают затопление портов, разрушение причалов, автомобильных и железных дорог, пляжевых тел: 580 (705) – Геническ; 555 (564) – Бердянск; 530 (600) – Мариуполь [5]. В принципе, денивеляции любого знака и сопровождающее их штормовое волнение способствуют переформированию пляжей и пере-сортировке пляжевого материала. Нагонные явления возникают при ветрах юго-восточного и южного направлений, имеющих сравнительно небольшую обеспеченность. Однако с изменением общих характеристик циркуляции воздушных масс частота и повторяемость этих явлений возрастает. Основное направление – вдоль береговых дрейфовых течений с северо-востока на юго-запад. Об этом свидетельствует и форма азовских кос, выполняющих функцию бун в перехвате вдоль берегового потока наносов.

Гидрометеорологический режим – один из главных факторов в питании пляжей твердым материалом, поступающим в прибрежную зону в виде твердого стока рек и абразии береговых клифов. Среди рек, впадающих в Азовское море, наибольшее количество твердого материала выносит р.Дон (до 6 – 7 млн. т в год). После строительства Цимлянского водохранилища эта величина сократилась до 2 млн. т в год [2]. По сравнению с Доном реки северо-восточного приазовья выносят в море в 13 раз меньше твердого материала. До зарегулирования твердый сток рек Кальмиуса и Берды играл значительную роль в образовании Белосарайской и Бердянской кос. Конус выноса р.Молочная являлся основным поставщиком кварцевого песка на пляжи косы Федотова, о.Бирючий, а при юго-западных ветрах – Бердянской косы. По данным Государственного водного кадастра суммарную величину твердого стока рек на изучаемом участке можно оценить в 150 тыс. т в год $\pm 20\%$. Из него большая часть в виде тонких фракций выносится за пределы прибрежной зоны. Только незначительная часть твердого стока, представленная средней и крупной фракцией, используется в формировании пляжей. В условиях дефицита пляжеобразующего материала неизбежно усиливается абразия береговых клифов и сокращается ширина пляжей.

Гидродинамика. Движение пляжевого материала осуществляется под действием гидрогенных факторов, среди которых главными является волнение моря, волновые и дрейфовые течения. Морская граница прибрежной зоны традиционно проводится по соотношениям: $0,1 - 0,3\lambda$ или $h/H = 0,6 - 0,7$, где λ и h – длина и высота волны, H – глубина моря. Для Азовского моря это означает, что морская граница располагается на глубине всего в несколько метров, зато в плане может достигать нескольких сотен метров.

Анализ многочисленных эмпирических и полуэмпирических построений позволяет обрисовать общие черты гидродинамики прибрежной зоны отмелого песчаного побережья. По особенностям деформации и разрушения волн на нем выделяются определенные участки (рис.1). Первый – от морской границы прибрежной зоны до подножья вдольберегового вала. На этом участке резко изменяется профиль волны, растут ее крутизна и высота. Горизонтальная составляющая скорости движения воды в придонном первом слое растет вплоть до разрушения волны. Второй – подводный вал, где волна частично или полностью разрушается. Орбитальные скорости уже в начале разрушения, например, при образовании ныряющего буруна, резко уменьша-



Р и с . 1 . Схемы циркуляции водных масс в прибрежной зоне.

(а) Циркуляция воды в прибойной зоне по [6]; профиль, показанный пунктиром, переходит в профиль, показанный сплошной линией, по мере того как волны большой крутизны переносят песок с пляжа (1) на подводный вал (2); H_g – высота волны.
 (б) Обобщенная схема поперечной циркуляции воды в береговой зоне, построенная на основе натуральных данных (по [7]); штриховка – перенос в сторону берега.
 (в) Схема движения водных масс в морфодинамических подзонах прибрежной зоны (по [4]); график – зависимость скорости движения воды в придонном слое от отношения высоты волны h и глубины H .

ются. При наличии нескольких вдольбереговых валов, в пространстве, их разделяющем, волны вновь становятся устойчивыми. Третий – участок между последним валом и частью пляжа, на котором волны полностью разрушаются, образуя волноприбойный поток. Здесь проявляются два противоположных процесса: концентрации и диссипации волновой энергии. При относительно небольшой деформации волн перенос водных масс в придонном слое направлен в сторону берега, при сильной деформации – в сторону моря [8]. По данным другой работы [7] на третьем участке дрейф всегда направлен в сторону моря. Направление придонного потока в сторону берега наблюдается только в том случае, если уклон дна лежит в пределах 0,04 – 0,06. При этих условиях поток воды к берегу существует независимо от параметров волн. Заметим, что такие уклоны дна на Азовском побережье встречаются весьма часто.

Участок пляжа, на котором происходит окончательное разрушение волн, называется прибойным. По И.Ф.Шадрину [9] он в свою очередь делится на три области. Нижняя лишена осушки и в ее пределах сталкиваются прямой и обратный волноприбойный потоки. Участок отличается наиболее высокой турбулентностью. Средняя характеризуется высокими скоростями прямого и обратного волноприбойных потоков и достаточно длительным временем осушки. По существу эту область пляжа можно сравнить с промывочным лотком, где происходит постоянная дифференциация пляжевого материала, разделение его на тяжелые и легкие фракции. Верхняя область подвержена лишь случайным или периодическим заплескам одиночных волн. В ее пределах отсутствует обратный волноприбойный поток. Для азовских пляжей нередки случаи, когда часть заплеска перехлестывает пляжевый вал, создавая однонаправленный в сторону берега волноприбойный поток.

Расположение прибойной области по отношению ко всему пляжу не является постоянным. При стонно-нагонных явлениях, учитывая небольшие уклоны азовских пляжей, она смещается в ту или иную сторону на десятки метров, а при катастрофических нагонах выходит за границы пляжевой зоны. В это время происходит частичное или полное переформирование пляжевых тел, с преобладающей тенденцией их размыва.

Общей чертой для тыловых частей заливов Азовского моря является многократное обрушение волн над подводными береговыми валами. Как правило, таких участков наблюдается не менее трех. Особенностью ближайшего к берегу вала можно назвать иногда встречающееся его кулисообразное приращение к пляжу. По существу, это явление ничто иное, как начальная стадия образования бара. Примером сформировавшегося бара в Азовском море служит Арабатская стрелка, со всеми полагающимися атрибутами: лагуной, характерным надводным и подводным профилями. В нашем случае, на месте приращения подводного вала к пляжу происходит забурнивание волн и активная аккумуляция пляжевого материала.

Литодинамика. Движение и дифференциация осадочного материала в прибрежной зоне определяется соотношением между скоростью движения воды и гидравлической крупностью частиц. При этом под дифференциацией, по определению Ю.Д.Шуйского [2], понимается «...совокупность механических процессов, вследствие которых из исходного материала разных

горных пород возникают разные по гранулометрическому и минералогическому составу наносы, частично уносимые в глубоководные области водоемов, частично задерживающиеся в береговой (прибрежной) зоне, частично возвращающиеся на сушу». В совокупности гидромеханических процессов наиболее важными параметрами являются: коэффициент турбулентного обмена, пульсационные составляющие скоростей турбулентного потока и средние значения придонных скоростей.

Наиболее сложно определяемым параметром является коэффициент турбулентного обмена. Для малых глубин он чаще всего рассчитывается либо по известной формуле Прандтля, либо исходя из уравнения баланса турбулентности [10]. В обоих случаях расчеты дают сугубо приближенный результат, для уточнения которого требуются новые теоретические и экспериментальные исследования. Как турбулентность, так и пульсационные составляющие скоростей влияют на перемещение и дифференциацию минеральных частиц избирательно. Для взвешенных частиц они являются одними из главных факторов движения, для сальтирующих и влекомых – второстепенными [11].

Придонные волновые скорости Vg могут быть рассчитаны для зоны малой деформации волн по теории волн малой амплитуды [9, 12]:

$$Vg = \pi h / \tau (\text{ch}(2\pi H / \lambda))^{-1}.$$

Для зоны сильно деформированных волн по теории одиночной волны:

$$Vg = \frac{1}{2} Nc = 33c,$$

где $N = 0,66$ при $h/H = 0,78$; c – скорость распространения волны.

Комментируя расчеты по приведенным формулам, П.А.Каплин [13] отмечает, что для внутренних морей, где волновой режим определяют короткие и крутые волны, аккумулятивные формы создаются не только поперечным, но и вдольбереговым перемещением наносов. Следовательно, при изучении механизма образования упомянутых форм нужно учитывать исходные параметры волн на глубокой воде, в первую очередь их длины и высоты.

В отдельных случаях для прибрежной зоны с медленно нарастающей глубиной подводного склона можно воспользоваться решением М.С.Лонге-Хиггинса [14], основанным на теории волн малой амплитуды. В этом случае принимается, что в каждой точке высота волны пропорциональна местной средней глубине: $h = a^*H$, где a^* – коэффициент изменяющийся от 0,6 до 1. При строгом соблюдении ограничений расчеты дают вполне приемлемые результаты.

Определение величин придонных скоростей используется для установления их критических значений, или, так называемых, срывающих скоростей. Критическая, или срывающая, скорость соответствует началу перемещения частиц по дну. В свою очередь, величина критической скорости неразрывно связана с физическими и морфологическими параметрами самой частицы – ее плотностью, окатанностью, гидравлической крупностью, диаметром (линейными размерами). В.А.Лонгинов [12] предлагает различать две критические скорости, одна из которых соответствует моменту нарушения равновесия отдельной частицы, а другая – началу массового движения частиц, например, в виде начала образования рифелей или начала движения

слоев частиц. На наш взгляд, это предложение сильно усложняет понятийное определение критической скорости. К тому же, на практике и та и другая определяются по одной формуле:

$$V_{кр.} = n \sqrt{dg} ,$$

где n – коэффициент пропорциональности, d – диаметр частицы, g – ускорение силы тяжести.

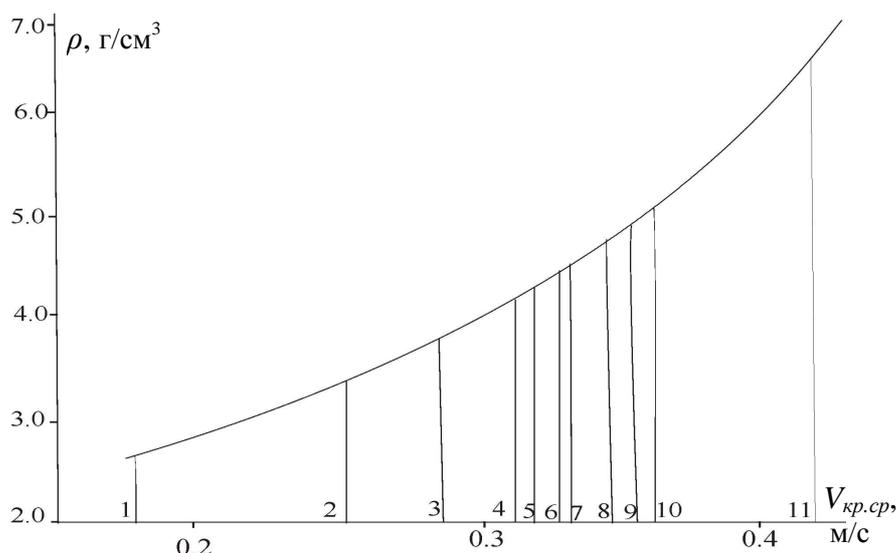
В ходе многочисленных экспериментов было установлено, что критическая срывающая скорость $V_{кр.ср.}$ в волновых потоках несколько большая, чем в русловых, зависит от физических свойств частиц и периода волны [15]:

$$V_{кр.ср.} = 41,4 \rho^{2/3} d^{1/3} \tau^{1/4} ,$$

где ρ – плотность частицы в воде, d – диаметр частицы, τ – период волны.

Поскольку плотность определяется минеральным составом, то для одного и того же диаметра, например, 0,22 мм для кварца с плотностью 2,65 г/см³, критическая срывающая скорость будет равна 0,17 м/с, а для титаномагнетита с плотностью 4,5 – 4,68 г/см³ она составит уже 0,36 м/с. Зависимость $V_{кр.ср.} = f(\rho)$ представлена на рис.2.

Дифференциация минеральных частиц происходит не только на поверхности дна под влиянием скорости волнового потока, но и по вертикали в деятельном слое грунта. Под деятельным слоем понимается верхняя часть современных наносов, испытывающая динамические волновые нагрузки, приводящие к частичному взвешиванию и дифференциации составляющего эти наносы материала. Опытным путем было установлено, что легкие минеральные частицы испытывают небольшое вертикальное смещение, а тяжелые опускаются к нижней границе деятельного слоя [8, 16, 17]. Используя в качестве меченых частиц тяжелые минералы с плотностью 4,68 г/см³ и гид-



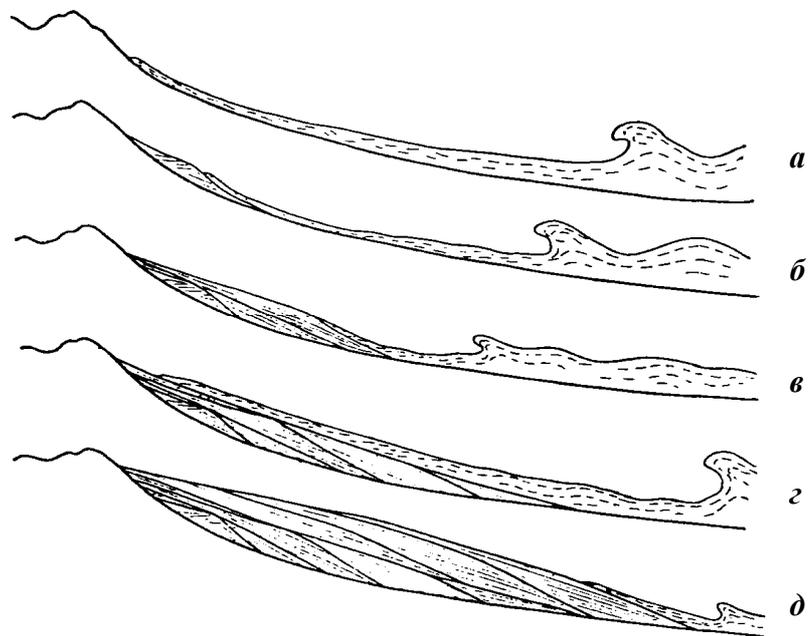
Р и с . 2 . График связи $V_{кр.ср.} = f(\rho)$ для частиц диаметром 0,22 мм. Минералы: кварц (1), сфен (2), гранат (уваровит) (3), гранат (альмандин) (4), рутил (5), ильменит (6), циркон (7), ксенотим (8), магнетит (9), монацит (10), касситерит (11).

равлической крупностью 11,3 см/с, Н.А.Айбулатов [8] установил, что в условиях умеренного волнения ($h = 1,1$ м, $\lambda = 22$ м, $\tau = 5,6$ с) скорость опускания тяжелых частиц составляет 2,4 см/мин, или 12 см за 5 мин при отсутствии значительных изменений рельефа дна.

На азовском побережье дифференциация пляжевого материала в штормовые периоды, особенно при сгонно-нагонных явлениях, приводит к образованию в пляжевых телах косой слоистости, проявляющейся в виде чередования легкой, более крупной песчаной фракции, представленной кварцем, и фракции, представленной тяжелыми минералами. Наиболее полно косая слоистость проявляется в субаэральной части пляжа. В период штормовых нагонов большую часть пляжа можно отнести к средней области приборойного потока, в которой сепарация частиц происходит за счет реверсивных движений прямого и обратного волноприбойных потоков (рис.3). В море в это же время дифференциация происходит в пределах деятельного слоя.

Наблюдаемые нами проявления косой слоистости в общих чертах совпадают с описанием ее в литературе [4]. По нормали к линии уреза проявления косой слоистости выглядят следующим образом:

- 1) наклон слоев в сторону моря обычно составляет $4 - 7^\circ$, реже $15 - 20^\circ$. Исключение составляют слои в 30° и горизонтальные;
- 2) прослои хорошо отсортированного материала объединяются в серии с одинаковым наклоном и крупностью слагаемых их частиц;
- 3) мощность прослоев меняется от 1 – 3 до 12 – 15 см. Наиболее мощные серии слоев до 30 – 40 см встречаются в средней и тыловой части пля-



Р и с . 3 . Формирование косослоистой толщи пляжа (по Ф.А.Щербакову и Ю.А.Павлидису); (а) – (г) – аккумуляция пляжевого материала на стадиях затухания волнения, (д) – профиль из вогнутого превращается в выпуклый с последовательным образованием косой слоистости.

жа в виде небольших линз с наклоном в сторону суши;

4) в разрезе, параллельном берегу, косая слоистость прослеживается на участках длиной 10 – 15 м, в отдельных случаях до 30 – 40 м. Эти участки резко прерываются сериями слабо наклонных слоев или однородными пляжевыми отложениями.

По нашему мнению большинство этих особенностей объясняется фазами шторма. Последние включают в себя изменения скорости ветра, угла подхода фронта волны к линии берега, высоты и длины волны. Соответственно происходит смещение волноприбойной области, меняются скорости волноприбойного потока, изменяется толщина деятельного слоя.

Вещественный состав пляжевых отложений. Легкая фракция пляжевых отложений представлена кварцевыми песками и частично ракушей. В кутовых частях заливов и дистальной части кос биогенный материал составляет несколько процентов, в проксимальных частях кос он доминирует. Очевидно, что и устойчивость кос абразии в значительной степени зависит от продуктивности популяций моллюсков.

Тяжелая фракция представлена различными минералами, главными из которых по количественному содержанию являются ильменит, рутил, амфиболы и гранат. В качестве примера приведем результаты минералогического анализа трех проб, отобранных в районе пос.Новопавловка на субаэральной части пляжа (проба 1) и на подводном склоне (пробы 2 и 3) (табл.).

Т а б л и ц а . Минералогический состав песчаных отложений пляжа и подводного берегового склона.

минерал	проба 1		проба 2		проба 3	
	ТФ	ИП	ТФ	ИП	ТФ	ИП
магнетит	2,1	0,02	0,8	0,02	0,7	0,03
ильменит	54,2	5,6	12,9	0,31	9,0	0,4
циркон	2,9	0,8	1,8	0,01	0,9	0,04
сульфиды	0,1	3	–	–	–	–
рутил	10,0	1,0	1,9	0,05	3,0	0,1
гранат	2,6	1,6	12,0	0,3	15,6	0,7
амфиболы						
пироксен	1,5	0,2	–	–	–	–
турмалин						
слюд.агрегаты	0,8	0,1	9,1	0,2	17,1	0,8
силлимонит	7,3	0,7	10,9	0,3	11,0	0,5
ставролит	–	–	1,0	0,02	0,5	0,02
эпидот	–	–	1,8	0,04	1,7	0,1
фосфат	–	–	–	–	0,3	0,01
монацит	0,2	знаки	0,5	0,012	1,1	0,05
апатит	–	–	–	–	3,0	0,1
итого тяж. фракции	100,0	10,2	100,0	2,4	100,0	4,7
кварц, полев. шпат	97,0	89,8		96,4		94,8
ракуша	3,0			1,2		0,5



Рис. 4. Прослои «черных песков» в районе пос.Новопавловка.

(рис.4). Дифференциация пляжевых песков в волноприбойном потоке на легкую фракцию, представленную кварцем, и тяжелую, представленную минералами с плотностью более 4 г/см^3 , начинается с критических срывающих скоростей $0,3 \text{ м/с}$.

В тяжелой фракции можно выделить три вида ассоциаций минералов. В первой преобладают пироксен и амфиболы, окрашенные в черный цвет. Во второй – гранат, главным образом альмандин, окрашенный в красный цвет. В третьей – ильменит, темного цвета. Третья ассоциация отличается еще и тем, что в ее составе содержится большее количество таких минералов, как монацит и ксенотим. Величина критической срывающей скорости для ильменита составляет $0,326 \text{ м/с}$, для монацита и ксенотима еще больше. Т.е. образование третьей ассоциации возможно при критических срывающих скоростях, существенно больших, чем для первых двух ассоциаций.

Практически все тяжелые минералы, представленные в тяжелой фракции, являются продуктами разрушения магматических горных пород. Наиболее вероятным источником их сноса в пляжевую зону является Приазовский кристаллический массив. Разделение тяжелых минералов на ассоциации происходило как во время транспортировки речным стоком, переотложении в аллювии, так и при переформировании пляжевых тел штормовым волнением. Неясным остается вопрос о количестве снесенного материала, т.к. после зарегулирования 35 – 40 лет назад всех впадающих в Азовское море рек, количество его в пляжевых отложениях существенно не изменилось. Между тем, этот вопрос имеет весьма важное практическое значение. Во-первых, ильменит, содержащийся в третьей ассоциации, можно рассматривать как россыпь проявления, поскольку он является сырьем для получения титана. Во-вторых, монацит и ксенотим – радиоактивные минералы, включающие радиоактивные элементы уран и торий. Концентрация их в «черных песках» существенно повышает естественный радиоактивный фон.

Проблема повышенного радиоактивного фона, особенно после Чернобыльской трагедии, приобрела для Украины особую остроту. В данном случае речь идет о естественной радиоактивности. Однако повышенный ее фон никак не способствует развитию курортно-рекреационного потенциала азовского побережья. В некоторых точках наших наблюдений величина гамма излучения многократно превышала допустимое в 30 мкр/ч .

Примечание: ТФ – тяжелая фракция, ИП – исходная проба.

Как видно из таблицы, в субаэральной части пляжа тяжелой фракции содержится в семь раз больше, чем на подводном склоне. Эта закономерность наблюдается на протяжении всего участка исследований. Закономерностью является и то, что тяжелая фракция выделяется в косоугольной слоистости в виде отдельных слоев темного цвета (т.н. «черные пески»)

Таким образом, изучение формирования пляжей Азовского моря направлены на решение как ряда теоретических, так и чисто практических проблем, имеющих региональное и общегосударственное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюхин Ю.В., Мамыкина В.А.* Межсезонная изменчивость поступления абразивного материала в береговую зону Азовского моря и его роль осадконакопления // Береговая зона моря.– М.: Наука, 1981.– С.67-73.
2. *Шуйский Ю.Д.* Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне.– Л.: Гидрометеоздат, 1986.– 240 с.
3. *Щербаков Ф.А., Долотов Ю.С., Рожков Г.Ф., Юркевич М.Г.* О механизме дифференциации песчаного материала в прибойной зоне моря // Механическая дифференциация твердого вещества на континентальном шельфе.– М.: Наука, 1978.– С.61-72.
4. *Щербаков Ф.А.* Материковые окраины в позднем плейстоцене и голоцене.– М.: Наука, 1983.– 216 с.
5. *Демидов А.Н., Миньковская Р.Я.* Катастрофические наводнения на побережье Черного и Азовского морей // Межвед. научно-техн. семинар «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий». Часть 1.– Киев, 1999.– С.103-109.
6. *Баском В.* Волны и пляжи.– Л.: Гидрометеоздат, 1966.– 280 с.
7. *Леонтьев И.О., Сперанский Н.С.* Анализ пульсаций переносной скорости в волновом потоке // Океанология.– 1979.– 19, № 6.– С.1082-1086.
8. *Айбулатов Н.А.* Динамика твердого вещества в шельфовой зоне.– Л.: Гидрометеоздат, 1990.– 482 с.
9. *Шадрин И.Ф.* Течения береговой зоны бесприливного моря.– М.: Наука, 1972.– 130 с.
10. *Коротков А.И., Павлов А.Н., Юровский Ю.Г.* Гидрогеология шельфовых областей.– Л.: Недра, 1980.– 220 с.
11. *Гришин Н.Н.* Механика придонных наносов.– М.: Наука, 1982.– 159 с.
12. *Каплин П.А.* Новейшая история побережий мирового океана.– М.: Изд. МГУ, 1973.– 265 с.
13. *Лонгинов В.В.* Динамика береговой зоны бесприливных морей.– М.: Изд. АН СССР, 1963.– 379 с.
14. *Лонге-Хиггинс М.С.* Механика прибойной зоны.– М.: Мир, 1974.– 143 с.
15. *Волков П.А.* Исследование взаимодействия волнового потока с дном // Экспериментальные и теоретические исследования процессов береговой зоны.– М.: Наука, 1965.– С.3-94.
16. *Ингл Д.* Движение пляжевых песков.– Л.: Гидрометеоздат, 1971.– 225 с.
17. *Павлов А.Н., Агарков А.Ю., Юровский Ю.Г.* Исследование процессов заносимости водозаборного ковша Сахалинской ГРЭС и экспериментальные работы по внедрению средств защиты водозаборных сооружений.– Л.: ЛГМИ, 1978.– 238 с.

Материал поступил в редакцию 28.01.2005 г.