

**ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ
И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
БЕРЕГОВОЙ
ЗОНЫ
ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ**

ФРУНЗЕ 1983

В.Н.Коротаев

ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПРОГНОЗА ДЕФОРМАЦИЙ
В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ОЗЕРА
В УСЛОВИЯХ СНИЖАЮЩЕСЯ УРОВНЯ

Геоморфологическое и гидрометеорологическое изучение береговой зоны озера Иссык-Куль началось с создания в 1962 г. на Тянь-Шаньской станции Берегового отряда, впоследствии преобразованного в Лабораторию гидродинамики береговых процессов высокогорных озер. За последние 20 лет составлено подробное описание (кадастр) берегов озера, выявлены общие закономерности берегоформирующих процессов и особенности формирования отдельных участков побережья [2, 3, 5, 7, 8, 10]. На фоне общего благополучия в области береговых исследований явно недостаточными являются наши знания по части их гидрометеорологического обоснования и количественного прогноза переформирований в береговой зоне [4, 6, 9]. До тех пор, пока не будет решена проб-

лема стабилизации уровня озера, остаются актуальными задачи расчета фактических площадей прироста берега в условиях опускающегося уровня. Наиболее распространенным способом определения тенденции развития берега являются многократные повторные межулиевые съемки береговой линии и экзотические промеры по закрепленным створам. В этом отношении наиболее показательны являются опыт береговых работ на Карабулукском стадионе. Некоторые обобщения по материалам этих наблюдений были одобриены в [47] и в статье Л.М. Смирновой настоящего собирника.

Длительный ряд наблюдений (с 1960 г.) в сопряжении с широким комплексом береговых работ (минимальная съемка береговой линии, экзотические промеры дна, грунтовая съемка, ветроводные и землеройные рекреации наблюдения, изучение динамики пляжа методом "штрафей" и движения наносов методом "трассиров") позволил расположить их в основу создания расчетных эмпирических формул динамики отмелого аккумулятивного выровненного, лагунного берега при условии преобразования поперечного перемещения наносов (до дна к берегу) и постоянного снижения уровня².

Теоретико-геологические условия стадионара. Полуостров Карабулун, которым начинается Орточекинский береговой район, своим происхождением обязан погружению в сторону озера шарнира Малоординской брахиантитанической складки. Осезая линия этой тектонической структуры хорошо прослеживается по ряду куполовидных поднятий, сложенных неоген-древнечетвертичными отложениями и возвышающихся над предплестоянной озерной террасой. Абразионные участки этой террасы, выработанные на склонах Большого и Малого Орточера, приподняты на высоту до 60-80 м и несут следы новейших деформаций. Голоценовая терраса имеет ширину 2 км и представлена серией береговых валов, сильно перевязанных в длину. Наиболее древняя часть её, прислоненная к отмершим абразионным обрывам среднейстолбовой террасы, имеет форму окаймленного берегового бара. Непосредственным продолжением полуострова в озере является общирное мелководье со средним уклоном подводного склона 0,0079. Десятиметровая изобата проходит в 5 км от берега. Песчаное дно осложнено несколькими рядами лигтифицированных гряд песчаника. Рисунок изобат до глубины 3 м повторяет контуры береговой линии, представляющей в плане чередование узких песчаных мысов и широких бухт (рис.1).

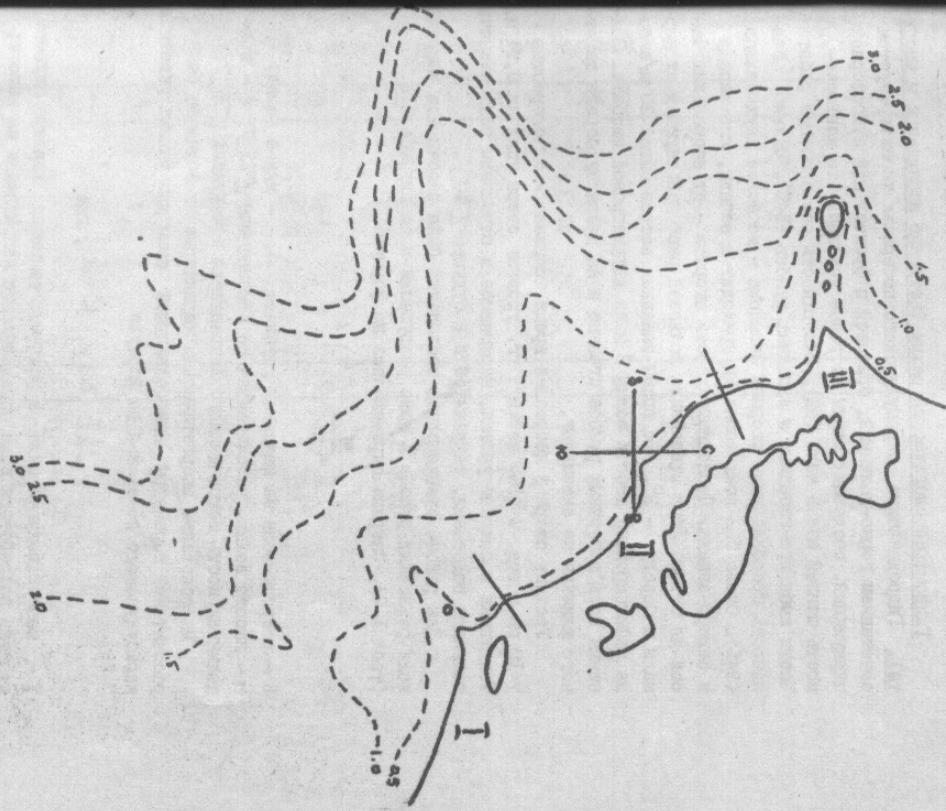


Рис. I. Схема береговых участков Карабулукского стадионара.

Гидрометеорологический режим (натурные наблюдения и расчеты).

Природнанитка карабулунского побережья характеризуется сочетанием горно-долинной, близовой и фронтальной атмосферной циркуляций, создающих такие ветровые условия, что повторяемость штилей очень мала (5%). Поверхность озера всегда рыбят. Часть эзби юго-западных и западных руллов (54%). Однако дальность преобладания штурмов невысока – не более двух баллов (94%). Около 55% всех волнений приходит с запада, юго-запада и северо-запада. Продолжительность штурмов – от нескольких часов до суток. Угол отклонения волновой равнолежащей от побережий юго-западных и западных руллов – 9°. Во время западных ветров силой 20 м/с берега защищированы высотой волн 2 м на двухметровой изобате. Волнение всех восточных руллов стонные и на динамику берега заметного влияния не оказывают.

Уровень озера в настоящее время понижается со скоростью 7–10 см в год. С 1965 по 1979 гг. уровень озера упал на 0,94 м. Тенденция к падению уровня, нарушающая в отдельные годы незначительными колебаниями, сохранится и в будущем $\sqrt{10} \text{ лет}$.

Для района стационарных наблюдений она рассчитана энергия волн различных руллов в зоне разрушения и на глубине 2 м (табл. I-2). Энергия определялась по формуле

$$E = \frac{1}{8} \rho c^2 \lambda t, \quad \text{где}$$

E – энергия волн на заданной глубине; λ – длина волны; ρ – масса волны, рассчитанная по nomogrammам $\sqrt{10}$; t – продолжительность ветра данного направления в секундах $\sqrt{10}$.

На основании энергетических характеристик волнения были рассчитаны параметры наноодвижущей силы для разных участков карабулунского побережья по формуле

$$T = k E \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \text{ где}$$

T – наноодвижущая сила в условных единицах, характеризующая степень воздействия волн определенного направления на наноны; E – энергия волнений различных руллов; α – угол подката волн к берегу; k – коэффициент пропорциональности, равный 1 (табл. 3).

Таблица I

Энергия волн в зоне разрушения (тыс. усл.ед.)

Руллы	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Ю	I,8	II9,0	4,7	5,3	3,5	6,0	4,1	4,0	3,3	1,7
КЗ	22,I	268,6	90,5	74,9	14,9	45,3	20,9	14,7	11,6	9,3
З	93,5	6955,0	291,4	430,0	79,6	51,6	73,4	51,3	61,4	15,4
КВ	34,9	1598,0	75,9	93,2	44,4	32,5	21,5	26,7	32,3	22,6

Продолжение таблицы I

Руллы	1975	1976	1977	1978	1979	1968–1973	1974–1976	1977–1979
Ю	2,3	9,9	6,3	2,9	4,6	26,3	14,0	9,1
КЗ	6,5	64,8	19,1	20,4	19,7	182,1	80,6	39,5
З	35,5	124,7	38,5	63,2	50,9	747,5	175,5	101,1
КВ	31,I	44,I	17,6	27,8	22,7	250,6	97,9	45,4

Таблица 2

Энергия волнений на глубине 2 м (тыс. усл. ед.)

I участок

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,6	32,4	5,4	23,0	12,7	17	1965
ЮЗ	15,7	1329,6	58,6	129,2	67,5	49	+44,9
З	48,7	41639,9	136,4	184,8	114,8	105	+178,7
ЮВ	15,6	616,0	54,9	206,7	88,7	62	+65,4
Сумма	81,6	43617,9	255,3	543,7	283,7	233	+338,5

II участок

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,5	83,0	5,5	23,1	12,0	16	1965
ЮЗ	15,7	1242,8	38,5	114,5	67,0	48	+127,0
З	58,6	4953,8	165,6	451,8	142,5	121	+289,3
Сумма	75,8	6279,6	209,6	589,4	221,5	186	+82,1

III участок

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,4	72,2	5,3	20,8	11,6	1	1965
ЮЗ	12,6	1039,4	59,0	103,3	56,4	3	+178,7
З	60,5	5253,8	170,0	371,0	137,3	9	+65,4
Сумма	74,5	6365,4	234,3	495,1	205,3	14	+338,5

По данным метеостанции Покровка, берег лобовой части острова Карабудун с 1960 по 1979 гг. развивался под пресным воздействием волнений, производимых ветрами юго-восточного и западных направлений. Юго-восточные ветры составляют 15-45% всех случаев, а западные - 8-22%, сила последних

Таблица 3

Величина "наносоносущей силы" (тыс. усл. ед.)

I участок

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,6	32,4	5,4	23,0	12,7	17	1965
ЮЗ	15,7	1329,6	58,6	129,2	67,5	49	+44,9
З	48,7	41639,9	136,4	184,8	114,8	105	+178,7
ЮВ	15,6	616,0	54,9	206,7	88,7	62	+65,4
Сумма	81,6	43617,9	255,3	543,7	283,7	233	+338,5

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,5	83,0	5,5	23,1	12,0	16	1965
ЮЗ	15,7	1242,8	38,5	114,5	67,0	48	+127,0
З	58,6	4953,8	165,6	451,8	142,5	121	+289,3
Сумма	75,8	6279,6	209,6	589,4	221,5	186	+82,1

Рубмы	1965	1966	1967	1967-	1973-	1973-	1976-
	1965	1966	1967	1968-	1973-	1976-	
Ю	1,4	72,2	5,3	20,8	11,6	1	1965
ЮЗ	12,6	1039,4	59,0	103,3	56,4	3	+178,7
З	60,5	5253,8	170,0	371,0	137,3	9	+65,4
Сумма	74,5	6365,4	234,3	495,1	205,3	14	+338,5

Примечание: знаки ± указывают направление движения наносов вправо и влево от наблюдателя, стоящего лицом к берегу.

богатые. Поэтому и энергия волнений западных рубов в 2-4 раза превосходит все остальные шторы. Подходя по нормали к подводным западных направлений энергично воздействуют на подводный склон, вызывая в движение пестранные и гравийно-галечные наслои и перемещая их к берегу.

Ветры юго-западного направления составляют 5-11% случаев и их энергия в 1,5-3 раза меньше, чем у юго-восточных волнений. Пряда, в отдельные годы (1967, 1970, 1976) наблюдалось обратное соотношение.

Ветры южного направления составляют 3-5% и производят очень слабые волны, энергия которых не превышает 10 тыс. усл. ед.

Скорость наиболее часто повторяющихся ветров этого направления 1-3 м/с (84-93% случаев). Средняя скорость ветра равна 1,1-2,3 м/с. Ветры со скоростью более 16 м/с повторяются крайне редко, но связанные с ними штормы обладают большой разрушительной силой.

За период наблюдений с 1960 по 1979 гг. наиболее штормовым был 1966 г., когда повторяемость ветров силой 15 м/с составила 1,5%. Ими были вызваны сильные волнения, энергии которых 30 раз превышала нормальную для этого участка берега, что сразу отразилось на процессах аккумуляции: прирост суши оказался 2 раза меньше средних величин. С 1966 по 1967 г. было размыто 1650 м² площади пляжа.

Современная динамика берега и расчетные формулы. Полусогласованная картина в силу своего положения относительно преобладающих ветровых потоков, тектонических условий и значительных запасов природного материала в береговой зоне на протяжении всей геологической истории озера Иссык-Куль всегда была областью устойчивой катализации. Морфология современных аккумулятивных форм говорят о генерализованности процессов барообразования на береговой линии. Правда, масштабы литодинамических процессов стали намного меньше, по сравнению, например, с раннеголоценовым временем.

Похождение основной линии берега было однока-
чественным деформацией в береговой зоне при пассивном осушении дна в условиях понижения уровня и при активной аккумуляции с учетом берегоформирующих факторов, то методика подсчетов прита-
ла плоскостей предусматривала использование повторных мезаульных съемок берега и промерных карт. За начало отсчета была выбрана съемка 1965 г., по которой были определены возможные площади суженного дна при снижении уровня озера на 2 м (табл.4). В среднем год прирост суши должен был составить примерно 11 тыс.м². Понижение уровня на 0,9 м в районе лобовой части полуострова требует должен был осушиться участок подводного склона, площадь 159350 м². Контрольная съемка берега и дна в 1979 г. показала, что понижение уровня на исследованном участке иссыккульского берега сопровождалось активной аккумуляцией наносов, поступавших с дна к берегу, и лейностатический среднегодовой прирост берега оставил примерно 14 тыс.м², а общий прирост берега оказался 38150 м² больше, чем предполагалось без учета берегоформирующих

Таблица 4
Предполагаемый прирост берега при пассивном падении уровня озера (тыс.м²)

Падение уровня, м	Участок			Общий прирост берега, тыс.м ²
	I	II	III	
0,2	2,9	6,9	1,2	II,0
0,4	7,3	39,4	3,3	50,0
0,6	13,4	49,8	14,5	77,7
0,8	19,1	63,7	46,2	129,0
1,0	25,0	92,8	71,9	189,7
1,2	30,0	107,7	85,6	223,3
1,4	34,8	121,6	83,4	239,8
1,6	42,9	134,8	91,4	269,1
1,8	53,7	146,2	97,4	297,3
2,0	78,0	168,0	-	-

Факторов (табл.5). Многократные повторные съемки берега позволяли вычислить величину действительного прироста берега за интервалы наблюдений 1965-1966 гг., 1966-1967 гг., 1967-1973 гг., 1973-1976 гг. и 1976-1979 гг. и были возможность сравнить изменение в морфологии берега со сменой уклонов подводного склона и величиной падения уровня озера дифференцированно по виденным расчетным участкам.

На I участке после образования аккумулятивной формы типа "крылатого мыса" к 1955 г. уклоны дна возросли до 0,012-0,036. До 1966 г. крылья этой аккумулятивной формы размывались, а лобовая часть мыса продолжала наращиваться. В дальнейшем, в связи с изменением угла подхода волн, размыту подверглась, наборот, лобовая часть "крылатого мыса", а материал, слагавший его, разносился по сторонам, усиливая аккумуляцию на смежных участках берега. В целом, для всего района наблюдений произошло ограничение береговой линии, но прирост суши на разных участках берега оказался неодинаков. Наименее прращение суши с 1965 по 1979 гг. (20650 м²) оказалось на I участке, к которому относится восточное крыло карабулукской аккумулятивной формы. Эта часть берега ориентирована по нормали и кистям слабым волнениям,

Таблица 5

Фактический прирост суши с учетом процессов аккумуляции (тыс.м²)

Период наблюдений	Падение уровня, м	Участок			Общий прирост суши, тыс.м ²
		I	II	III	
1965-1966	0,04	5,8	31,8	0,8	38,4
1966-1967	0,08	-1,6	5,6	1,4	5,4
1967-1973	0,22	12,8	53,9	45,6	112,3
1973-1976	0,27	2,0	0,3	9,9	12,2
1976-1979	0,33	1,7	13,0	14,5	29,2
1965-1979	0,94	20,6	104,6	72,2	197,5

а наиболее энергичные штормы западных и восточных губов, подхолдящих под углом к берегу, обуславливают разрыв берега. Накольная энергия волн отмечалась в 1966 г., когда её значение оказалось в 50-100 раз выше, чем в другие годы. В результате этого усилилась эрозия берега, и прирост суши был минимальным. С 1966 по 1967 г., размытое 1650 м² пляжа. В последующие годы отмечался некоторый прирост берега, но за три года (1976-1979 гг.) аккумулировано всего лишь 1700 м² суши, что, однако, не меньше среднегодового прироста для I участка - 1475 м². Графическое выражение всех изменений в деформации береговой зоны первого участка показано на рис.2, где одна кривая (γ_1^I) отражает предполагаемый прирост суши при пассивном развитии берега, а другая (γ_I) - фактический прирост суши за счет аккумуляции наносов и снижения уровня на 2 м. Первая кривая описывается формулой

$$\gamma_1^I = 4534 + 1794x + 15650x^2 \text{ м}, \text{ где}$$

дов - доверительный интервал, зависящий от числа наблюдений и величины экстраполяции. График фактического прироста суши, выраженный линейной функцией

$$\gamma_I = 2377 + 24758x \text{ (м)}$$

зло и построенный для 0 и 0,94, проходит над кривой γ_1^I .

Следовательно, фактический прирост берега на I участке преобла-

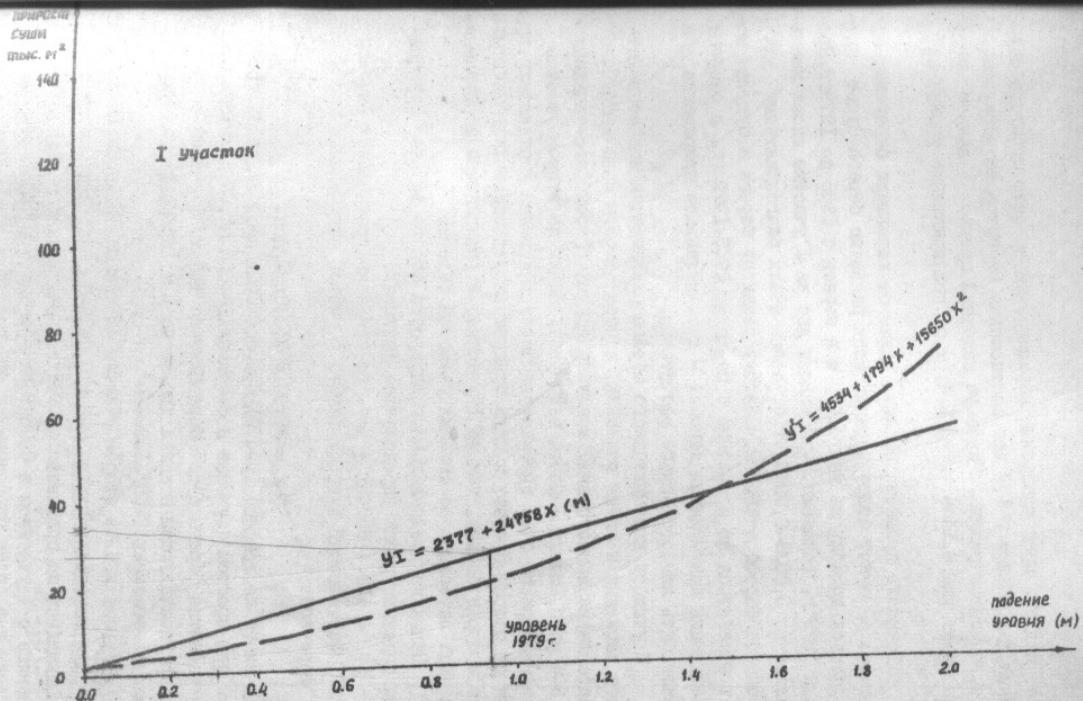


Рис.2. Графики фактического и предполагаемого прироста суши на I участке. Условные обозначения: сплошной линией показана аккумуляция с учетом берегоформирующих факторов, прерывистой линией дан прирост суши при пассивном осушении.

дает над его предполагаемым наращиванием за счет простого осушения дна. При $x > 1,7$ это соотношение сменится на обратное, т.е. начнется размыв. Наиболее надежный прогноз в данном случае будет для $0,94 < x < 1,4$, т.е. при понижении уровня на 0,5 м.

Точность прогноза зависит также от характера береговых процессов: он будет более верным, если развитие берега будет продолжаться по тому же типу, что и в период с 1966 по 1979 гг. Примеры 1979 г. показали, что уклоны дна на I участке вновь уменьшились до 0,0023–0,0041, т.е. опять стали благоприятными для процесса барообразования. Поэтому развитие берега в будущем может изменяться по сравнению с периодом 1965–1979 гг. В сторону улучшения аккумуляции наносов – действительное притяжение дна может быть намного больше расчетного.

II участок караудужского берега развивается под воздействием западных и южных волнистых, причем энергия волн западного направления намного выше волнений других румбов (юго-западных в 3–4 раза, южных – почти в 30 раз). Берег на этом участке размывается за счет притяжения береговых валов и отделения лагут от озера. Прирост суши в среднем за год составляет 7475 м², что в 5 раз больше, чем на I участке, и объясняется поступлением сюда материала со смежных участков берега.

Величина предполагаемого прироста берега за счет осушения при падении уровня определяется функцией:

$$y_{II} = 418 + 85045x \pm \text{дов}$$

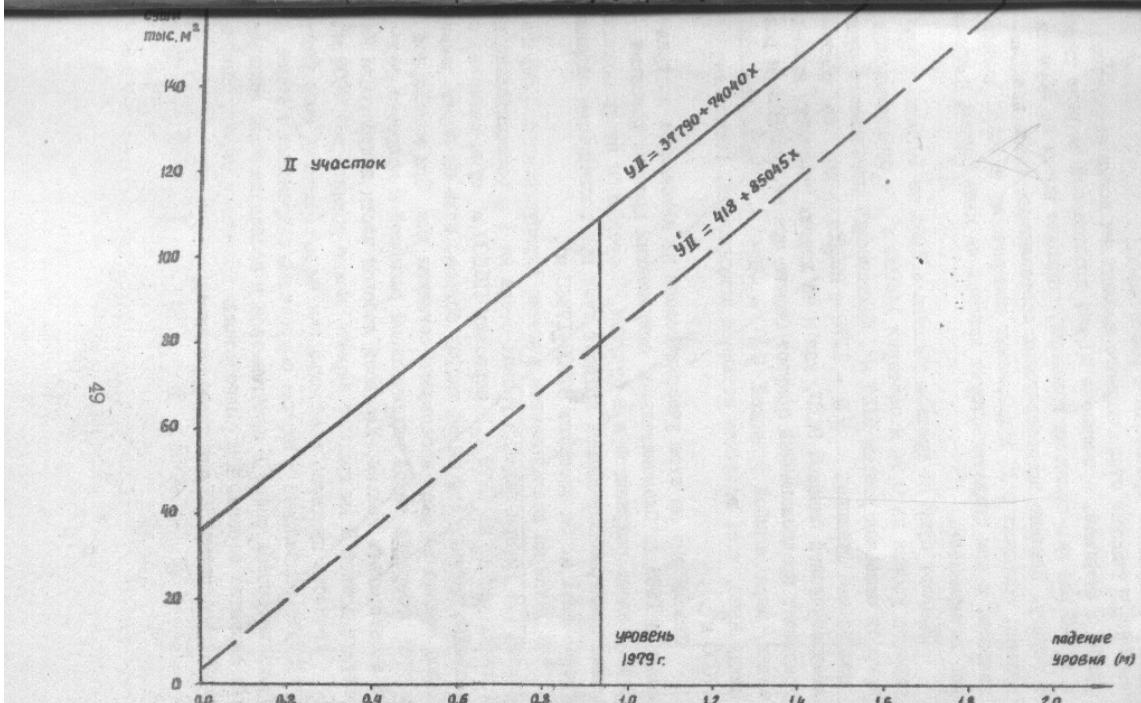
5782. Фактический прирост берега с учетом аккумуляции выражается формулой

$$y_{II} = 37790 + 74040x \pm \text{дов}$$

Как видно из графика (рис.3), прирост суши происходит быстрее, чем при простом осушении и составил 104650 м². В дальнейшем естественное развитие берега будет определяться той же функцией $y_{II}(x)$, то при последующем падении уровня на 1 м прирост суши на этом участке составит 77000 м².

Уклоны дна на втором участке по данным промеров 1979 г. равны в интервале глубин 0–2 м 0,0023–0,0054. Они значительно уменьшились по сравнению с 1965 г., когда были равны 0,017 на границе с I участком и 0,0049 на границе с III участком. Новые уклоны дна более благоприятны для процесса барообразования,

Рис.3. Графики фактического и предполагаемого прироста суши на II участке. Условные обозначения, что и на рис.2.



это может усилить процессы аккумуляции и повышенные значения прироста суши по сравнению с расчетными.

На III участке стационарного наблюдения долин залежного грунта с энергией, примерно в 30 раз превышающей энергию лежких и в 2–5 раз юго-западных волнений, подходит почты по нормали к берегу. Влияние юго-береговых составляющих здесь незначительно, основная роль принадлежит широченному потоку донных наносов, о чем свидетельствуют выборы на шлях ракуш и обломков литийникотов.

Прирост суши на третьем участке с 1965 по 1979 гг. при падении уровня на 0,94 м составил 14690 м^2 , а среднегодовой прирост оказался равным 5157 м^2 . Фактическое наращивание суши описываемое функцией $Y_{III} = 1175 + 85360x$ ± дов со средней квадратической ошибкой 9410, как и на других участках, намного превышает предполагаемый прирост берега при его пассивном развитии, выраженный функцией $Y'_{III} = -9046 + 65068x$. Разница между ними, т.е. величина истинной аккумуляции, составляет 27000 м^2 .

Уклионы дна на этом участке совсем не изменились по сравнению с 1965 г. Следовательно, оверенный процесс развития берега здесь сохранится и в будущем. Посредством экстраполяции можно примерно определить прирост суши при последующем падении уровня на 1 м. Он составил $87000 \pm 17560 \text{ м}^2$.

В целом на исследованном участке карабулукского берега длиной 1,4 км, при падении уровня озера на 1 м (относительно положения уровня на 1979 г.) нарастет 19100 м^2 суши (вместе с площадью лагуны). Это на 64 тыс. м^2 больше, если бы берег разился только за счет пассивного осаждения дна. При инженерной оценке потребуется такой выдающейся приросте берега пренебрегать нельзя. Для всей лобовой части полуострова Карабулук длиной 5 км прирост берега можно оценить в 70000 м^2 .

Точность прогноза с использованием примененных выше формул будет наибольшей в случае сохранения современного темпа снижения уровня озера и наметившейся в последние годы тенденции развития берега. Для долгосрочных прогнозов период стационарных наблюдений должен быть увеличен.

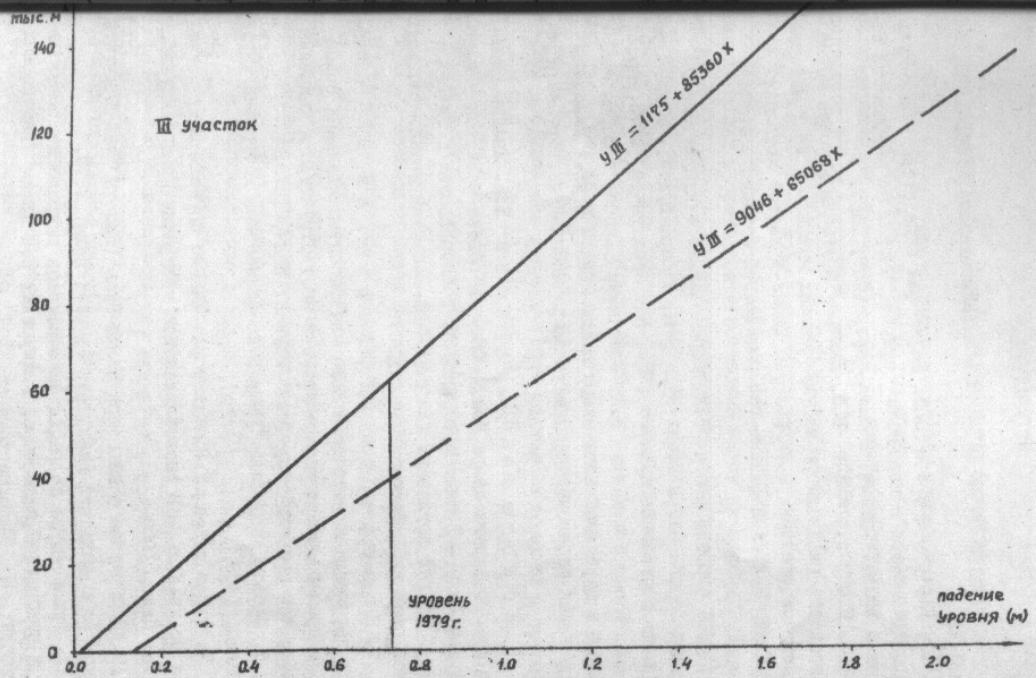


Рис. 4. Графики фактического и предполагаемого прироста суши на III участке. Условные обозначения, что и на рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

I. Климатические справочники (ежегодники), 1965-1979,
вып. I-I3.

2. Коротаев В.Н. Береговая зона озера Иссык-Куль
(кадастр берегов и подводного склона. Очерки по морфологии бе-
реговой зоны). Фрунзе, Изд.АН Киргиз.ССР, 1967.

3. Коротаев В.Н. Влияние крутизны уклонов подво-
дного склона на эволюцию аккумулятивных мысов.- В кн.: Материя-
лы по геоморфологии и гидрологии Иссык-Кульской котловины (Ра-
боты Тянь-Шаньской физико-географической станции). Фрунзе:
Илим, 1967.

4. Коротаев В.Н. Формирование аккумулятивного
рельефа берега озера Иссык-Куль у мыса Кара-Булун.- В кн.: Эро-
зия почв и русловые процессы. М., Изд.Моск.ун-та, 1973, вып.3.

5. Коротаев В.Н. Источники наносов и формы акку-
муляции в береговой зоне озера Иссык-Куль.- В кн.: Динамика
современных береговых процессов озера Иссык-Куль. Фрунзе: Илим,
1981.

6. Коротаев В.Н., Орлова Т.Б. Анализ дина-
мики южного берега озера Иссык-Куль на основе расчетов наносо-
движущей силы.- В кн.: Материалы по геоморфологии и гидрологии
Иссык-Кульской котловины (Работы Тянь-Шаньской физико-географи-
ческой станции). Фрунзе: Илим, 1967.

7. Никифоров Л.Г., Коротаев В.Н. Особен-
ности перемещения наносов в зоне внутриконтинентальных водоемов
на примере озера Иссык-Куль.- В кн.: Структура и динамика
компонентов природы Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1973.

8. Озеро Иссык-Куль (Очерки по физической географии). Фрун-
зе: Илим, 1978.

9. Орлова Т.Б. Некоторые данные по волновому режиму
озера Иссык-Куль.- В кн.: Физическая география Прииссыкулья.
Фрунзе: Илим, 1970.

10. Прибрежная зона озера Иссык-Куль (Работы Тянь-Шаньской
физико-географической станции). Фрунзе: Илим, 1979.

II. Руководство по расчетам элементов гидрологического ре-
жима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных
изысканиях. М.: Гидрометеоиздат, 1973.