

УДК 551.345:551.583.001.18(235.221)

О ПРОГНОЗЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

С.С. Марченко

Дан прогноз изменения среднегодовых температур воздуха в центральной части Заилийского Алатау. Методом численного моделирования получена оценка термического состояния высокогорной криолитозоны и изменение границ ее распространения до 2020 года.

Факт потепления климата в течение 20-го столетия общеизвестен. По данным специалистов Межправительственной группы по проблемам изменения климата (IPCC), за последние 100 лет глобальная температура поверхности Земли увеличилась на 0,3-0,6 °С [12]. По существующим оценкам, повышение температуры воздуха за тот же период в различных высокогорных регионах оценивается в 0,5-0,8 °С [16]. За 70-летний период среднефоновый прирост приземной температуры по Чуйской долине составил 2,5 °С, Иссык-Кульской котловине 1,5 °С, плато Тянь-Шань 0,4 °С [6]. В связи с этим отмечается рост температур альпийской криолитозоны [15, 17, 19]. Многолетнемерзлые породы, особенно приповерхностный слой годовых колебаний температуры, обладают высокой чувствительностью к изменениям теплового режима на поверхности. В Заилийском Алатау на абсолютных высотах 3320-3350 м геотермические наблюдения в течение последних 23 лет показали наличие восходящего тренда в динамике температурного режима мерзлых толщ, который, в зависимости от льдистости отложений, составил 0,2-0,4 °С. Среднее значение глубины сезонного протаивания в течение указанного периода увеличилось на 25-30 %.

По данным высокогорных метеостанций, расположенных в Заилийском Алатау, наблюдается рост средней летней, зимней и годовой температур воздуха. Динамика изменения температурных показателей по некоторым из них, расположенным на различных высотных уровнях в центральной части Заилийского Алатау, приведена в табл. 1 и на рис. 1. В качестве критерия (см. табл. 1) использована разность средних значений температуры воздуха за последние (1977-1996 гг.) и первые двадцать лет наблюдений (ΔT). Причем, значения, приведенные в числителе, характеризуют средние годовые показатели температуры воздуха, в знаменателе - средние за холодный период (с отрицательной средней месячной температурой воздуха).

Таблица 1

Значения средних годовых и средних за холодный период температур воздуха и их изменения по метеостанциям центральной части Заилийского Алатау

Метеостанция	Высота, м абс.	Период наблюдений, годы	Среднее значение температуры, °С, за			ΔТ, °С
			весь период наблюдений	первые 20 лет	1977-1996 гг.	
Алматы	847	1879-1996	<u>8,5</u>	<u>7,3</u>	<u>9,4</u>	<u>2,1</u>
ГМО			<u>-6,0</u>	<u>-8,0</u>	<u>-4,6</u>	<u>3,4</u>
Большое Алматинское Озеро	2506	1932-1996	<u>1,2</u>	<u>0,9</u>	<u>1,5</u>	<u>0,6</u>
			<u>-6,4</u>	<u>-7,0</u>	<u>-6,1</u>	<u>0,9</u>
Мынжилки	3017	1937-1996	<u>-1,9</u>	<u>-2,2</u>	<u>-1,5</u>	<u>0,7</u>
			<u>-7,1</u>	<u>-7,5</u>	<u>-6,8</u>	<u>0,7</u>

По данным М Алматы ГМО (абс. высота 847 м), в течение последних 117 лет среднегодовая температура воздуха увеличилась на $2,1^{\circ}\text{C}$, а среднее значение температуры воздуха за холодный период, который на этом высотном уровне равен трем зимним месяцам, возросло на $3,4^{\circ}\text{C}$. При этом, наибольший рост температур наблюдался в первые два десятилетия 20-го века (см. рис. 1). Менее длительные ряды наблюдений по М Большое Алматинское Озеро (абс. высота 2506 м) и М Мынжылки также свидетельствуют о наличии восходящего тренда среднегодовой и средней за холодный период температур воздуха. Продолжительность периода с отрицательной среднемесячной температурой воздуха на абсолютных отметках 2506 м и 3017 м соответственно ноябрь - март и октябрь - апрель.

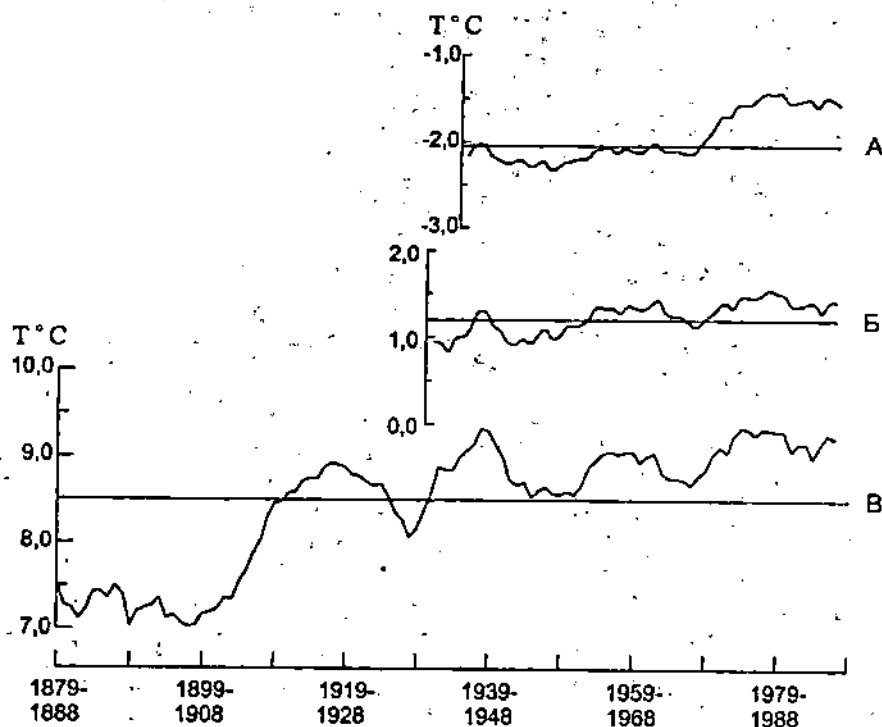


Рис. 1. Многолетний ход средней годовой температуры воздуха, сглаженной десятилетними скользящими средними по данным метеостанций: А - Мынжылки, Б - Большое Алматинское Озеро, В - Алматы ГМО, горизонтальные прямые характеризуют значение средней многолетней температуры воздуха.

Многолетний ход среднегодовой температуры воздуха показывает (см. рис. 1), что колебания температуры на всех трех высотных уровнях происходит в одной фазе и близким по значению размахом. Это дает основание предполагать, что величина тренда средней годовой

температуры воздуха за последние 100-120 лет на высотных отметках 2500 и 3000 м имеет тот же порядок, что и на уровне М Алматы ГМО.

На сегодняшний день имеется достаточно много работ, посвященных исследованию временных рядов с целью изучения периодичности метеорологических величин. Выделение основных структурных элементов ряда (элементарных гармоник с определенными периодами) с дальнейшей экстраполяцией только этих составляющих неоднократно использовалось в мировой практике [3,4,5,8,13]. Для получения спектра ряда среднегодовых температур воздуха, зафиксированных на М Алматы ГМО, использован метод Диминга с применением функции окна данных для уменьшения величины смещения в периодограммной оценке [14]. В табл. 2 представлены пять лучших (по величине размаха) периодов, полученных в результате спектрального разложения ряда.

Таблица 2

Основные периодические составляющие ряда среднегодовых температур воздуха по М Алматы ГМО

Период, годы	Размах, °С	Частота, год ⁻¹
182,437	1,049	0,00548
81,196	0,604	0,01232
22,124	0,532	0,04519
8,021	0,327	0,12467
3,483	0,354	0,28710

Полученные ритмы (см. табл. 2) могут быть сопоставлены с 80-90-летним ритмом солнечной активности и 22-летним периодом перемены магнитной полярности солнечных пятен, что может являться дополнительным прогностическим признаком. Кривая, синтезированная на основе полученных данных (рис. 2, кривая 1), показала удовлетворительное совпадение периодов повышения и падения температуры, отраженных натурной кривой в течение метеонаблюдений (см. рис. 2).

Для прогнозной оценки возможного изменения температуры воздуха в будущем рассматривались два варианта. В первом варианте предполагается, что температура воздуха будет изменяться в соответствии с естественно-природной динамикой климата. Второй предусматривает возможное глобальное потепление с наложением фактора парниковых газов. Согласно оценкам, полученным ранее, ожидаемое антропогенное повышение средней глобальной температуры воздуха к 2025 г. составит 2 °С, а к середине 21 века оно достигнет 3-4 °С [10].

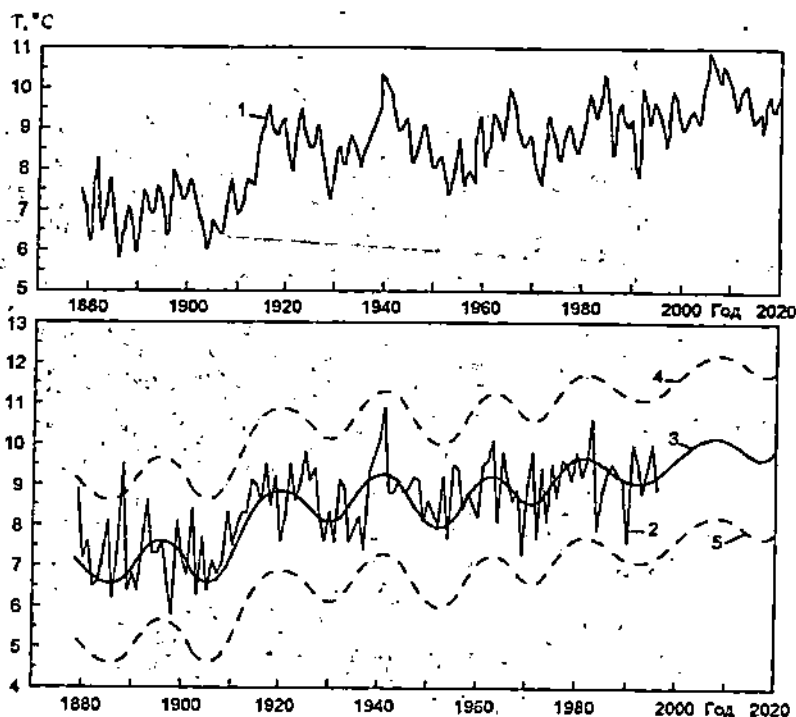


Рис. 2. Анализ векового хода среднегодовой температуры воздуха и ее прогноз по М Алматы ГМО: 1 - кривая, полученная в результате гармонического синтеза; 2 - ход среднегодовой температуры; 3 - синтетическая кривая, отфильтрованная низкочастотным фильтром; 4, 5 - отклонения от расчетных значений с 5 и 95 % - й обеспеченностью соответственно.

Анализ более поздних данных позволяет считать, что возможному влиянию парникового эффекта при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере, будет соответствовать повышение средней глобальной температуры в пределах $1,5-2,0^\circ\text{C}$ [7,18]. Принимая во внимание широтное распределение интенсивности проявления глобальных климатических изменений, а также основываясь на полученных прогнозных данных, можно предположить, что для высокогорных районов Заилийского Алатау ожидаемое повышение температуры к 2020 г. может составить $2,4-2,7^\circ\text{C}$ по сравнению с концом девятнадцатого века.

Существующие в настоящее время разработки не позволяют дать однозначную количественную оценку изменения годовой и, тем более сезонной, нормы осадков при возможном глобальном потеплении. Результаты палеоклиматических реконструкций показывают, что в высокогорных районах Тянь-Шаня в периоды потеплений не происходило значительного увеличения увлажненности [1]. Некоторые исследователи считают, что вероятное повышение температуры в Средней Азии

вызовет такое смещение к югу зоны большей увлажненности, что на Памире количество осадков возрастет, а в Тянь-Шане, наоборот, уменьшится [11]. Для целей геокриологического прогноза наибольшее значение имеет количество осадков, выпадающих в течение холодного периода. Изменение их количества было принято на основе реконструкции и прогноза осадков холодного периода в Заилийском Алатау по дендрохронологическим данным [2]. В соответствии с этим можно предположить, что в начале 20 столетия их количество возрастет, а в интервале 2010-2020 гг. уменьшится.

Для приближенной прогнозной оценки реакции многолетней криолитозоны Заилийского Алатау на предполагаемые климатические изменения проведена серия расчетов по программе, представляющей реализацию разностного алгоритма численного решения одномерной, многофронтной задачи типа Стефана для многослойной среды. Процесс исследовался в рамках его одномерной модели кондуктивного теплообмена с учетом скрытой теплоты при фазовых превращениях влаги через сосредоточенную теплоемкость. Это приводит к вычислительной процедуре разностного решения задачи без явного выделения фронтов [9]. Нелинейное уравнение теплопроводности имеет вид

$$[C(x,t)+\delta(t)Q(x)] \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x,t) \frac{\partial t}{\partial x} \right]. \quad (1)$$

Левая часть уравнения представляет собой эффективную теплоемкость, где $C(x,t)$ - теплоемкость породы, зависящая от глубины x и температуры t , $Q(x)$ - теплота фазового перехода воды, $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака, обладающая свойствами:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \neq t^*(x) \\ \infty, & \text{если } t = t^*(x) \end{cases}$$

$t^*(x)$ - температура начала замерзания воды в породе; $\lambda(x,t)$ - коэффициент теплопроводности горных пород.

На верхней границе расчетной области задавались граничные условия 3-го рода (условие Ньютона), на нижней - постоянное значение теплототока, характерное для исследуемого района, 25 мВт/м^2 . Численное решение краевой задачи строилось по неявной разностной схеме, имеющей погрешность аппроксимации $O(h^2 + \Delta\tau)$, h и $\Delta\tau$ - соответственно шаг расчетной сетки по глубине и времени. Получаемая система алгебраических уравнений для значений сеточной температуры решается методом прогонки с итерациями на каждом временном слое. Реализованная схема безусловно устойчива для произвольных h и $\Delta\tau$.

В качестве примера рассматривался район перевала Жусалькесен (хр. Заилийский Алатау, $43^{\circ} 05' \text{ с.ш.}$, $76^{\circ} 55' \text{ в.д.}$, высота 3336 м абс.). В

этом месте, в диапазоне абсолютных высот 3320-3350 м, расположена сеть термометрических скважин и, начиная с 1973 г., проводятся работы по программе инженерно-геокриологического мониторинга. В течение расчетного периода 1980-1995 гг. в качестве верхних граничных условий задавались средние многолетние данные средней месячной температуры воздуха и мощности снежного покрова. В дальнейшем производилось изменение входных параметров до прогнозных значений. Теплофизические и влажностные характеристики грунтов задавались в соответствии с данными реальных геологических разрезов. Расчет производился для слабльдистых (до 5 %) и льдистых (до 30 %) отложений. Прогностические расчеты охватывают период 1995-2020 гг. При этом оценивались динамика изменения температуры горных пород по глубине (рис. 3), а также изменение мощности сезонно-талого слоя (рис. 4).

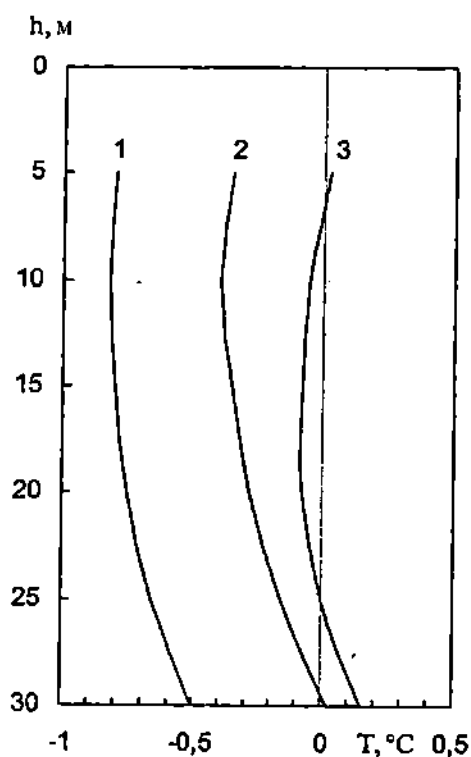


Рис. 3. Геотермические профили в рыхлообломочных, льдистых отложениях в районе перевала Жусалыкезен, (скв. № 1): 1, 2 - соответственно 1975 и 1995 гг. (по данным термометрии); 3 - прогнозная кривая в соответствии с естественно-природной динамикой климата (2020 г.).

Согласно расчетам, на конец прогнозного периода высокольдистые мерзлые толщи будут иметь практически безградиентный термический режим и произойдет разобщение слоя сезонного промерзания с кровлей многолетней мерзлоты. Глубина залегания кровли мерзлых пород к 2020 г. составит примерно 5,6 или 6,5 м, в зависимости от принимаемого варианта климатических изменений. Мощность слоя сезонного промерзания колеблется в пределах 4,7 - 5,2 м.

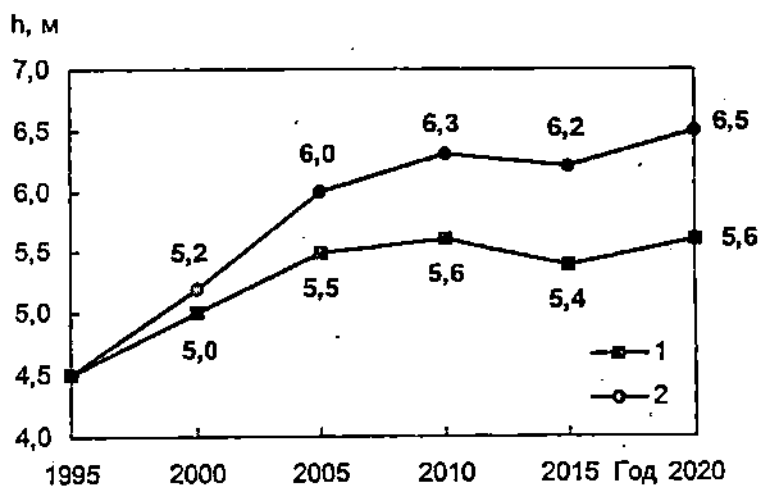


Рис. 4. Прогноз изменения глубины сезонно-талого слоя h в льдистых, рыхлообломочных отложениях Защийского Алатау (высота 3337 м абс.): 1 - при естественной динамике климата; 2 - с учетом возможного глобального потепления.

Таким образом, при условии сохранения в будущем современного тренда климатических показателей, можно ожидать заметное изменение термического режима многолетней криолитозоны. Наиболее существенные преобразования могут произойти в грунтах с низким содержанием влаги, а также в подпоясах островного и прерывистого распространения мерзлых пород (2700-3600 м). У нижней границы этих высотных зон будет наблюдаться исчезновение небольших по площади островов мерзлоты, другие уменьшатся в размерах. В итоге произойдет увеличение абсолютных высот нижней границы распространения многолетней мерзлоты, которое к 2020 г. может составить около 200-250 м.

Решение подобных задач может быть использовано для оценки преобразования высокогорной криолитозоны в целом. Этот подход

предусматривает создание мелкомасштабных геокриологических прогнозных карт, отражающих региональные закономерности изменения таких параметров, как мощность мерзлых пород, высотная граница их распространения, глубина залегания кровли мерзлоты, мощность слоя сезонного оттаивания и промерзания, направленность процесса. В соответствии с этим появляется возможность определить тенденции и характер развития мерзлотно-геологических процессов и явлений, а также связанных с ними ландшафтно-геоморфологических изменений.

Автор выражает признательность А.В. Кусакину и В.П. Горанскому, сотрудникам Государственного Астрономического Института им. Штернберга, и М. Брегеру (M. Breger), Астрономический Институт в Вене, за любезно предоставленные программы, реализующие методы спектрального оценивания, а так же за критические замечания в процессе дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешинская Э.В., Мельникова А.П. История растительности и климата Северного Тянь-Шаня в голоцене (по палинологическим данным) // Палеоклиматы позднеледниковья и голоцена. - М.: Наука, 1989. - С. 131-138.
2. Борщева Н.М. Реконструкция осадков холодного периода в Заилийском Алатау дендрохронологическими методами // Ледники, снежный покров и лавины в горах Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1989. - С. 126-132.
3. Дзердзеевский Б.Л. Флюктуации климата и проблема сверхдолгосрочного прогноза // Изв. АН СССР. Сер. геогр. - 1968. - № 5. - С. 43-55.
4. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 158 с.
5. Ершов Э.Д., Максимова Л.Н., Медведев А.В. Комплексная методика определения верхних граничных условий для целей геокриологического прогноза (на геологические и исторические отрезки времени) // Материалы первой конференции геокриологов России. - Т.2 - М., 1996. - С. 292-308.
6. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Изменения регионального климата, обусловленные природными факторами и антропогенным воздействием // Тезисы докладов Международной конференции "Высокогорные исследования: изменения и перспективы в XXI веке". - Бишкек, 1996. - С. 244.
7. Кондратьев К.Я. Новые тенденции в исследованиях глобального климата // Изв. РГО. - 1996. - Т.128, вып. 6. - С. 47-54.
8. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. - М.-Л.: ГОНТИ, 1939. - 207 с.

9. Моисеенко Б.Д., Самарский А.А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Вычислительная математика и математическая физика. - 1965. - Т.5, № 5. - С. 816-827.
10. Предстоящие изменения климата. (Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях). - Л.: Гидрометеопиздат, 1991. - 271 с.
11. Соломина О.Н. Ледники и климат Средней Азии за последние 2000 лет // Материалы гляциологических исследований. - 1995. - Вып. 79. - С. 69-75.
12. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. - 1995. - 467 p.
13. Currie R.G. Solar Cycle Signal in Air Temperature in North America: Amplitude, Gradient, Phase and Distribution // J. Atmos. Sci. - 1981. - Vol.38. - P.808-818:
14. Deeming T.J. Fourier Analysis with Unequally-Spaced Data // Astrophysics and Space Science.- 1975. - V.36. - P.137-158.
15. Gorbunov A.P. The Warming of Permafrost of the Tien Shan // Global Changes and Geography, Moscow. - 1995. - P.125.
16. King L., Gorbunov A.P. and Evin M. Prospecting and Mapping of Mountain Permafrost and Associated Phenomena // Permafrost and Periglacial Processes.- 1992. - Vol.3. - P.73-81.
17. Mountain Permafrost and Climatic Change / W.Haerberli, C.Guodong, A.P. Gorbunov, S.A. Harris // Permafrost and Periglacial Processes. - 1993. - Vol.4. - P.165-174
18. Permafrost and Vegetation Response to Global Warming in North Eurasia / A.A. Velichko, O.K. Borisova, E.M. Zelikson, V.P. Nechayev // Biotic Feedbacks in the Global Climatic System. New York. Oxford. Oxford Univ. Press. - 1995. - P.134-156.
19. Wang B., French H.M. Climate Controls and High-Altitude Permafrost, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China // Permafrost and Periglacial Processes. -1994. - Vol. 5. - P.87-100.

Международный центр геоэкологии гор
аридных районов МН-АН РК

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІНЕ БАЙЛАНЫСТЫ ІЛЕ АЛАТАУЫНДА ҚАТЫП ҚАЛҒАН ЖЫНЫСТАРДЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ КҮЙІН БОЛЖАУ ТУРАЛЫ

С.С. Марченко

Іле Алатауының орта бөлігінде жылдық орташа ауа температурасы өзгеруінің болжамы берілген. Сандық үлгілеу әдісімен биіктаулық криолитозонның жылулық күйіне және 2020 жылға дейінгі оның таралу шекарасының өзгеруіне баға берілді.