

ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА И СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ КАРТ

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме последствий для биосферы глобального изменения климата (Potential..., 1995; Climate change and ..., 1996; Глобальные экологические..., 1998). В настоящем сообщении показан прогнозный расчет изменения растительности Горного Алтая при возможном потеплении климата. Расчет основан на использовании статической биоклиматической модели растительности региона, которая прогнозирует коренную растительность без учета ее сукцессионных (временных) изменений.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ КОРЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ РЕГИОНА

Под картами коренной растительности горных регионов мы понимаем карты, отображающие распределение по территории растительности, не претерпевшей антропогенной, пирогенной либо другой трансформации и находящейся в равновесном состоянии с климатом.

Одним из подходов для составления таких карт является применение биоклиматических моделей, связывающих категории растительности с климатическими параметрами. Многолетний опыт по изучению связей растительности и климата в горах Южной Сибири (Поликарпов и др., 1986) показал, что наиболее информативными для распределения лесной растительности в горах из множества климатических показателей и индексов являются суммы температур выше 5°C, характеризующие теплоресурсы, и радиационный индекс сухости Будыко, характеризующий соотношение тепло- и влагоресурсов на изучаемой территории (Будыко, 1971). Аналогичные климатические показатели использовали авторы «Корреляционной эколого-фитоценологической карты Азиатской России» (Букс, 1976).

Радиационный индекс сухости получают путем деления радиационного баланса на произведение годовых осадков и удельную теплоту парообразования. Для расчета радиационного баланса мы использовали среднемесячные многолетние данные метеостанций региона по количеству осадков, температуре и влажности воздуха, облачности, даты установления и схода снежного покрова, необходимые для расчета альбедо. Таким образом, мы рассчитали радиационный баланс для 20 станций, находящихся в Горном Алтае и предгорьях и обладающих данными для расчетов. Годовой радиационный баланс изменялся по территории от 980 МДж/м² для Кара-Тюрека до 1800 МДж/м² для Родино.

Каждая из 20 станций была отнесена к определенной категории растительности — высотно-поясному комплексу растительности (ВПК) (по: Типы лесов..., 1980) и ординирована в осях «сумма температур — индекс сухости». Сумма температур бралась из «Справочников по климату» (1967). Рассматриваются следующие генерализованные ВПК, принятые для всего региона гор Южной Сибири (Типы лесов..., 1980): горная тундра, субальпийское редколесье, подгольцовое редколесье, темнохвойная горная тайга, светлохвойная горная тайга, подтайга и лесостепь, черневая тайга, горная степь, опустыненная степь.

В биоклиматической модели растительности Горного Алтая, созданной на основе этих климатических показателей (Parfenova, Tchebakova, 1998), все темнохвойные ВПК — субальпийское редколесье, горная темнохвойная и черневая тайга — располагаются в области избыточного увлажнения, при значениях индекса сухости менее 0,8; лесные оробиомы от степных отделяются индексом сухости 1,8. Внутри темнохвойных и светлохвойных таежных формаций дифференциация высотных поясов идет по теплу.

В представленном сообщении, чтобы максимально использовать климатическую информацию, имеющуюся для этого сложного горного региона, мы модифицировали нашу биоклиматическую модель следующим образом. Основываясь на данных 40 метеостанций для Горного Алтая и прилегающих территорий, мы нашли тесную корреляцию между суммами температур выше 5°C и июльской температурой:

$$T_7 = 4,783 + 0,005962 \times T5; \quad R^2_{adj.} = 0,975; \quad St. Er. = 0.54.$$

Радиационный индекс сухости Будыко тесно коррелировал с другим комплексным индексом, названным нами комплексным индексом увлажнения (КИУ) и представляющим собой отношение июльской температуры к годовым осадкам (для удобства восприятия умноженный на 100). Следует отметить, что индекс увлажнения, подобный нашему, использовали китайские исследователи при прогнозе изменения растительности Тибета. Отличие между индексами состоит в том, что вместо июльской используется биотемпература Холдриджа, равная среднегодовой температуре, при расчете которой среднемесячные отрицательные температуры принимаются равными нулю (Climate change and..., 1996).

Связь нашего КИУ с индексом сухости Будыко для 20 метеостанций региона выражалась уравнением:

$$КИУ = 0,605 + 2,504 \times ИС; \quad R^2_{adj.} = 0,940; \quad St. Er. = 0,65.$$

Таким образом, мы применили июльские температуры и комплексный индекс увлажнения для построения представленной в настоящем сообщении биоклиматической модели. Ординация ВПК в этих осях показана на рис. 1. Граничные значения климатических показателей для ВПК даны в табл. 1.

Таблица 1

Биоклиматическая модель растительности Горного Алтая

ВПК	Температура июля, °С		Комплексный индекс увлажнения	
	нижний предел	верхний предел	нижний предел	верхний предел
Тундра	—	8,5	—	—
Субальпийское редколесье	8,5	11,5	—	2,2
Подгольцовое редколесье	8,5	11,5	2,2	4,0
Темнохвойная горная тайга	11,5	14,5	—	2,2
Светлохвойная горная тайга	11,5	14,5	2,2	4,0
Подтайга и лесостепь	14,5	18,5	2,2	4,0
Черневая тайга	14,5	18,5	—	2,2
Степь	10,5	19,0	4,0	7,5
Опустыненная степь	14,0	—	7,5	—

Для установления пространственного распределения ВПК по территории Горного Алтая необходимо сопряжение биоклиматической модели с распре-

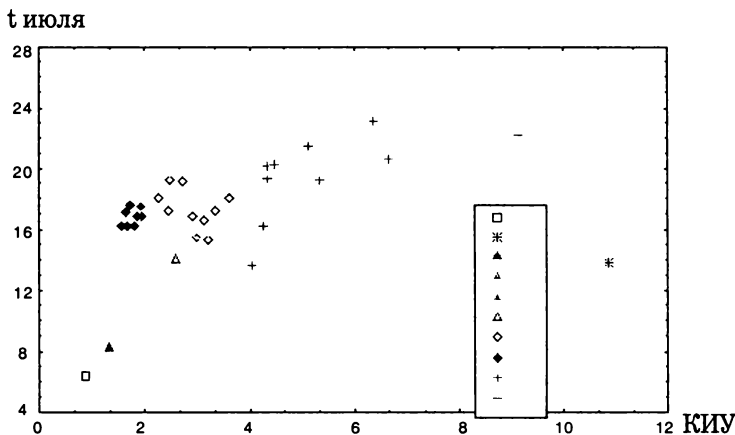


Рис. 1. Ординация высотно-поясных комплексов Горного Алтая.
 ВПК: 1 — тундра; 2 — тундростепь; 3 — субальпийское редколесье; 4 — подгольцовое редколесье; 5 — темнохвойная горная тайга; 6 — светлохвойная горная тайга; 7 — подтайга и лесостепь; 8 — черневая тайга; 9 — степь; 10 — опустыненная степь.

делением июльской температуры и КИУ, что требует создания слоев этих климатических показателей для территории. Мы использовали цифровую модель рельефа с 30'' разрешением с сервера NOAA и климатическую субмодель региона. Все расчеты и визуализации сделаны для модельного окна в рамках 49—52° с. ш., 84—90° в. д., в котором насчитывалось 257 760 пикселей.

Климатическая субмодель региона представляет собой систему множественных регрессионных уравнений, описывающих зависимость климатических параметров — июльских температур и годового количества осадков от абсолютной высоты, широты, долготы с учетом приуроченности к определенной подпровинции (по: Огуреева, 1980). Для осадков мы составили регрессионные уравнения отдельно для Северо-Западно-Алтайской, Северо-Алтайской, Центрально-Алтайской, Северо-Восточно-Алтайской и Монгольско-Алтайской подпровинций.

Для получения множественных регрессий нами использовался пакет Statistica v. 4.5 (Боровиков и Боровиков, 1997).

Распределение июльских температур хорошо описывалось одним уравнением для всего региона:

$$T_7 = 62,61 - 0,00613 \times H - 0,81086 \times \text{Lat.};$$

$$R^2_{\text{adj.}} = 0,91; \text{ St. Er.} = 0,96; n = 40,$$

где H — абсолютная высота, в м; Lat. — широта, в градусах.

Осадки для Центрально-Алтайской подпровинции описывались уравнением:

$$\text{Осадки} = 242,75 + 0,1823 \times H; R^2_{\text{adj.}} = 0,67; \text{ St. Er.} = 83 \text{ mm}; n = 7;$$

для Северо-Восточно-Алтайской:

$$\text{Осадки} = -33669,4 + 0,6 \times H + 413,7 \times \text{Lat.} + 146,8 \times \text{Lon.};$$

$$R^2_{\text{adj.}} = 0,7; \text{ St. Er.} = 104; n = 8,$$

где Lon. — долгота, в градусах;

Для Северо-Западно-Алтайской:

$$\text{Осадки} = 32.35 + 1,7543 \times H; R^2_{\text{adj.}} = 0,84; \text{St. Er.} = 64 \text{ mm}; n = 7.$$

В пакете Idrisi for Windows 2.0 — наиболее доступной растровой ГИС — эти регрессионные уравнения были сопряжены с цифровой моделью рельефа, в результате чего были получены слои климатических показателей.

Далее были проведены процедуры реклассификации слоев июльской температуры и КИУ в соответствии с граничными значениями для ВПК из табл. 1. Наложением этих двух реклассифицированных слоев мы получили для каждого пикселя единственную климатическую комбинацию, определяющую соответствующий ВПК. Картина распределения коренных ВПК по региону показана на рис. 2 (см. вкл.).

Адекватность потенциальной растительности, полученной из биоклиматической модели, геоботаническим картам в работах А. В. Куминовой (1960) и Г. Н. Огуревой (1980) продемонстрировала надежность нашей модели.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ИЗМЕНИВШЕМСЯ КЛИМАТЕ

Мы применили биоклиматическую модель Горного Алтая для прогнозной оценки изменения растительности при возможных изменениях климата, к которому в последние годы приковано внимание научного сообщества (Climate change, 1996; Climate change and..., 1996; Глобальные экологические..., 1998).

Сценарии изменения климата могут быть получены модельным путем — из моделей общей циркуляции атмосферы (Climate change, 1996; Climate change and..., 1996) и аналоговым путем — определением климата-аналога, уже имевшего место в геологическом прошлом земли (Менжулин, 1998).

Для региона Горного Алтая в соответствии с обоими подходами может быть принят следующий сценарий изменения климата: +2°C к летней температуре и +20% годовых осадков. Мы рассчитали климатические показатели изменившегося климата и, подставив их в биоклиматическую модель, получили соответствующее распределение растительности (рис. 3, см. вкл.). Для сравнения в табл. 2 приведены площади, занимаемые тем или иным ВПК, в условиях современного и потеплевшего климата.

Таблица 2

Площади ВПК Горного Алтая в различных климатических условиях

ВПК	Площадь, %	
	при современном климате	при изменении климата
Тундра	31,7	13,6
Тундростепь	3,7	6,3
Субальпийское редколесье	21,9	17,8
Подгольцовое редколесье	—	0,9
Темнохвойная горная тайга	10,9	20,4
Светлохвойная горная тайга	9,5	2,2
Подтайга и лесостепь	14,7	18,5
Черневая тайга	4,9	14,4
Степь	1,1	4,0
Опустыненная степь	1,6	1,9
Итого	100,0	100,0

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы получили компьютерные карты распределения коренной растительности Горного Алтая при современном и изменившемся климате на базе биоклиматической модели. Некоторые расхождения между модельной картой современных ВПК и геоботаническими картами имеют место как вследствие отображения геоботаниками уже отчасти трансформированной растительности, так и вследствие модельной генерализации, выражающейся, например, в неучете крутизны и экспозиции склонов в данном случае.

Анализируя табл. 2, мы видим, что в целом при использованном нами сценарии изменения климата перераспределение площадей ВПК в Горном Алтае идет в пользу более продуктивных и флористически богатых. Однако в настоящее время многие исследователи прогнозируют при таких сценариях повышение уровня пожароопасности (Weber, Flannigan, 1997), что может препятствовать развитию растительности до стадии климатического климакса.

Полученные нами оценки изменений площадей различных типов растительности Горного Алтая при потеплении климата носят предварительный характер и могут быть пересмотрены при появлении конкретных региональных сценариев климатических изменений. Очевидно, изменения климата скажутся и на агроценозах, что напрямую отразится на уровне экономики региона. Судя по тому, что расположение снеговой линии определяется показателями теплообеспеченности, влияние глобального потепления распространится и на ледники Горного Алтая. Оценить последствия этого влияния — задачи для специалистов соответствующих областей знаний.

Удовлетворительный результат испытаний биоклиматической модели Горного Алтая, построенной на основе июльских температур и комплексного индекса увлажнения, позволяет рекомендовать ее для использования в задачах прогноза и восстановления трансформированной растительности, а созданную по ней карту размещения высотных поясов — в качестве эталона распределения коренной растительности в задачах мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

- Боровиков В. П., Боровиков И. П. *Statistica: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows*. М., 1997. 592 с. — Будыко М. И. *Климат и жизнь*. Л., 1971. 472 с. — Букс И. И. *Методика составления и краткий анализ корреляционной эколого-фитоценологической карты Азиатской России м. 1 : 7 500 000 // Геоботаническое картографирование 1976*. Л., 1976. С. 44—51. — Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века. М., 1998. 302 с. — Куминова А. В. *Растительный покров Алтая*. Новосибирск, 1960. 450 с. — Менжулин Г. В. *Прогнозирование изменений регионального климата и оценки их основных последствий // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века*. М., 1998. С. 197—237. — Огуреева Г. Н. *Ботаническая география Алтая*. М., 1980. 188 с. — Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. *Климат и горные леса Южной Сибири*. Новосибирск, 1986. 225 с. — *Справочники по климату СССР*. Вып. 20. Л., 1964—1970. — *Типы лесов гор Южной Сибири / Под ред. В. Н. Смагина*. Новосибирск, 1980. 336 с. — *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses / Eds. R. T. Watson, M. C. Zinyowera, R. H. Moss and D. J. Dokken*. Cambridge, 1996. 880 p. — *Climate change and plants in East Asia / Eds. K. Omasa, K. Kai, H. Taoda, Z. Uchijima, M. Yoshino*. Tokyo, 1996. 215 p. — *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains / Eds. A. Guisan, J. I. Holten, R. Spichiger, L. Tessier*. Geneve, 1995. 195 p. — *Parfenova E. I., Tchebakova N. M. Modeling of vegetation distribution in Mountain Altai // Проблемы экоинформатики: Матер. III Междунар. симпоз. (Москва, 8—9 декабря 1998 г.)*. М., 1998. С. 122—125. — Weber M. G.,

SUMMARY

E. I. P A R F E N O V A, N. M. T C H E B A K O V A

POSSIBLE VEGETATION CHANGE IN MOUNTAIN ALTAI UNDER CLIMATE WARMING AND COMPILING THE PROGNOSIS MAPS

Global climate warming is expected to be a new factor influencing vegetation redistribution and productivity in the XXI century. In this paper possible vegetation change in Mountain Altai under global warming is evaluated. The attention is focused on forest vegetation being one of the most important natural resources for the regional economy.

A bioclimatic model of correlation between vegetation and climate is used to predict vegetation change (Parfenova, Tchebakova 1998). In the model, a vegetation class — an altitudinal vegetation belt (mountain tundra, dark-coniferous subalpine open woodland, light-coniferous subgolets open woodland, dark-coniferous mountain taiga, light-coniferous mountain taiga, chern taiga, subtaiga and forest-steppe, mountain steppe) is predicted from a combination of July Temperature (JT) and Complex Moisture Index (CMI). Borders between vegetation classes are determined by certain values of these two climatic indices. Some bioclimatic regularities of vegetation distribution in Mountain Altai have been found: 1. Tundra is separated from taiga by the JT value of 8.5°C; 2. Dark-coniferous taiga is separated from light-coniferous taiga by the CMI value of 2.25; 3. Mountain steppe is separated from the forests by the CMI value of 4.0. 4. Within both dark-coniferous and light-coniferous taiga, vegetation classes are separated by the temperature factor.

For the spatially model of vegetation distribution in Mountain Altai within the window 84 E — 90 E and 48 N — 52 N, the DEM (Digital Elevation Model) was used with a pixel of 1 km resolution. In a GIS Package IDRISI for Windows 2.0, climatic layers were developed based on DEM and multiple regressions relating climatic indices to physiography (elevation and latitude). Coupling the map of climatic indices with the authors' bioclimatic model resulted into a vegetation map for the region of interest. Visual comparison of the modelled vegetation map with the observed geobotanical map (Kuminova, 1960; Ogureeva, 1980) showed a good similarity between them.

The new climatic indices map was developed under the climate change scenario with summer temperature increase 2°C and annual precipitation increase 20% (Menzhulin, 1998). For most mountains under such climate change scenario vegetation belts would rise 300—400 m on average.

Under current climate, the dark-coniferous and light-coniferous mountain taiga forests dominate throughout Mountain Altai. The chern forests are the most productive and floristically rich and are also widely distributed. Under climate warming, light-coniferous mountain taiga may be expected to transform into subtaiga and forest-steppe and dark-coniferous taiga may be expected to transform partly into chern taiga. Other consequences of warming may happen such as the increase of forest productivity within the territories with sufficient rainfall and the increase of forest fire occurrence over territories with insufficient rainfall.

ЛИТЕРАТУРА

- Боровиков В. П., Боровиков И. П.* Statistica: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М., 1997. 592 с.
- Будыко М. И.* Климат и жизнь. Л., 1971. 472 с.
- Букс И. И.* Методика составления и краткий анализ корреляционной эколого-фитоценологической карты Азиатской России м. 1 : 7 500 000 // Геоботаническое картографирование 1976. Л., 1976. С. 44—51.
- Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века.* М., 1998. 302 с.
- Куминова А. В.* Растительный покров Алтая. Новосибирск, 1960. 450 с.
- Менжулин Г. В.* Прогнозирование изменений регионального климата и оценки их основных последствий // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века. М., 1998. С. 197—237.
- Огурева Г. Н.* Ботаническая география Алтая. М., 1980. 188 с.
- Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск, 1986. 225 с.
- Справочники по климату СССР.* Вып. 20. Л., 1964—1970.
- Типы лесов гор Южной Сибири / Под ред. В. Н. Смагина. Новосибирск, 1980. 336 с.
- Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses / Eds. R. T. Watson, M. C. Zinyowera, R. H. Moss and D. J. Dokken.* Cambridge, 1996. 880 p.
- Climate change and plants in East Asia / Eds. K. Omasa, K. Kai, H. Taoda, Z. Uchijima, M. Yoshino.* Tokyo, 1996. 215 p.
- Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains / Eds. A. Guisan, J. I. Holten, R. Spichiger, L. Tessier.* Geneve, 1995. 195 p.
- Parfenova E. I., Tchebakova N. M.* Modeling of vegetation distribution in Mountain Altai // Проблемы экоинформатики: Матер. III Междунар. симпоз. (Москва, 8—9 декабря 1998 г.). М., 1998. С. 122—125.
- Weber M. G., Flannigan M. D.* Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impacts on fire regimes // Environ. Rev., 1997. Vol. 5. P. 145—166.