

УДК 528.813:629.78

В.А.Головко, Т.В.Кондранин

*Московский физико-технический институт
(государственный университет)*

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
АНОМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ДИНАМИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Разработана статистическая модель пространственно-временной изменчивости длинно- и коротковолновой составляющих радиационного баланса Земли (РБЗ). Модель отражает основные особенности аномальных природных явлений в динамически неустойчивой климатической системе. На основе данных космических наблюдений составляющих РБЗ, полученных с помощью различных космических систем, в том числе и российских, реконструирован временной ряд глобальных полей обеих составляющих уходящей радиации за последние 20 лет. Проанализированы возможности предсказуемости поведения аномальных природных явлений на основе изучения дистанционных (дальних) связей (teleconnections) наблюдаемых радиационных процессов в энергоактивных зонах Земли и «остальных регионах» земного шара.

The statistical model of time-and-space variability of long-wave and short-wave components of the Earth-radiation budget (ERB) has been developed. The model reflects the basic features of anomalous natural phenomena in a dynamically unstable climatic system. Space observations of the ERB components obtained as a result of use of different space observation systems, including the Russian ones, the time series of global fields of the both components of transmitted radiation for the last 20 years have been reconstructed. The capabilities of predictability of behavior of anomalous natural phenomena on the basis of analysis of remote telecommunication used to observe radiation processes in power-active zones of the Earth and other regions of the globe were analyzed as well.

Планетарный радиационный баланс является ключевым параметром в исследовании климата. Космический мониторинг глобальных потоков излучения служит основным инструментом исследования изменчивости распределения источников и стоков радиационной энергии. Пространственно-временное распределение компонентов радиационного баланса Земли (РБЗ) на уровне «верхней границы атмосферы» может служить основой для определения потоков энергии, которые управляют общей циркуляцией атмосферы и океанов, являясь в то же время следствием этой циркуляции. Совместно наблюдаемые коротковолновый (КВ) и длинноволновый (ДВ) компоненты РБЗ позволяют объяснить особенности соответствующих расчетных значений баланса глобальной климатической системы и его отдельных региональных составляющих.

На основе данных космических наблюдений составляющих РБЗ, полученных в разное время с помощью различных космических систем, в том числе и российских, реконструирован временной ряд глобальных полей уходящей ДВ- и КВ-радиации за последние 20 лет. Изучение географического распределения компонентов РБЗ позволило получить полезную информацию об аномалиях погоды (климата) по данным наблюдений из космоса. Согласно реконструированному временному ходу ДВ-составляющей РБЗ в экваториальной зоне ($\pm 20^\circ$) за последние 20 лет на основе высокоточных измерений составляющих РБЗ, был отмечен, начиная с середины 80-х гг. XX в., в экваториальном поясе Земли аномальный (более чем на 5 Вт/м^2) рост ДВ-компонента уходящего излучения, который является прямым доказательством последствий наблюдаемого глобального потепления. На основе рекон-

струированных данных разработаны статистические модели пространственно-временной изменчивости составляющих РБЗ, отражающие особенности аномальных природных явлений в динамически неустойчивой климатической системе*.

Построение математической модели и прогнозирование дальнейшей динамики исследуемых явлений базировались на анализе полученных временных рядов наблюдений составляющих РБЗ. В основу моделирования были положены два разных метода анализа временных рядов: метод анализа сингулярного спектра (АСС) и метод построения модели авторегрессии. Базовый алгоритм первого метода реализуется в четыре этапа: развертка одномерного ряда в многомерный; анализ главных компонент (сингулярное разложение выборочной корреляционной матрицы); отбор главных компонент; восстановление одномерного ряда.

Методы, базирующиеся на АСС, в настоящее время широко используются в теории динамических систем. Эти методы эффективно могут быть использованы при анализе климатических сигналов с повторяющимися конфигурациями точек в пространстве развертки, что дает возможность не только аппроксимировать аттрактор, но и извлекать некоторую информацию о динамике климатической системы. На основе

* Головки В.А. Радиационный баланс Земли: новые приложения для изучения природных стихийных бедствий из космоса / В.А.Головки, В.В.Козодеров // Исслед. Земли из космоса. 2000. N 1. С.26-41.; Головки В.А. Информационная модель индикаторов природных бедствий для анализа последствий явления «Эль-Ниньо» по данным временных рядов спутниковых наблюдений радиационного баланса Земли / В.А.Головки, Т.В.Кондранин, С.К.Овчинников // Космонавтика, радиоэлектроника, геоинформатика: Труды 3-й Междунар. науч.-тех. конф. Рязань, 2000. С.300-303.

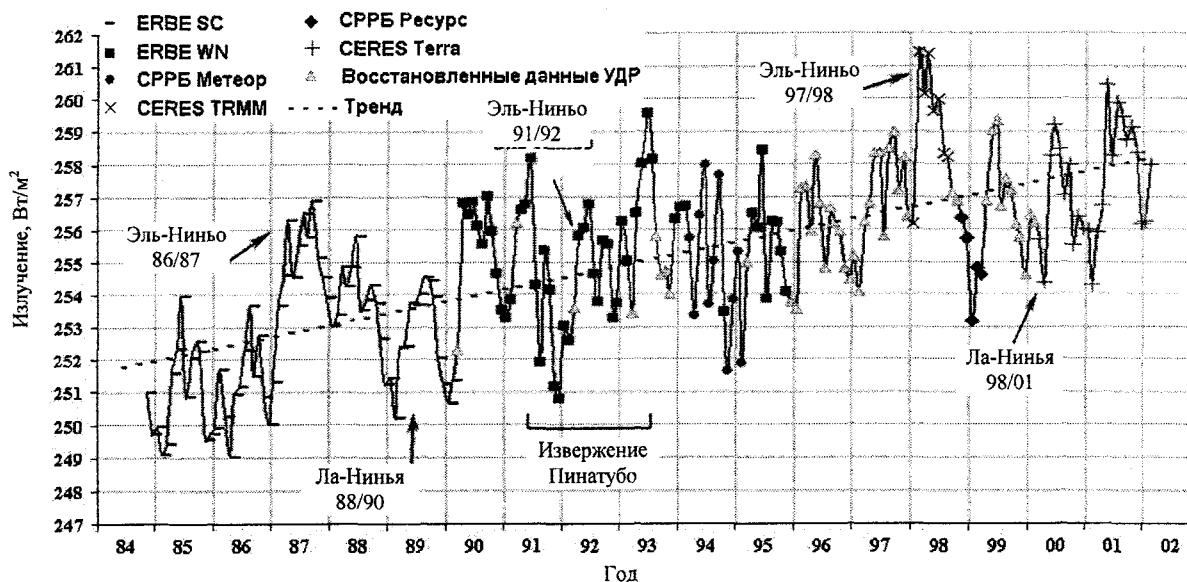


Рис.1. Реконструированный временной ход длинноволновой составляющей радиационного баланса Земли в экваториальной зоне ($\pm 20^\circ$) за последние 20 лет и основные аномальные природные явления за этот период

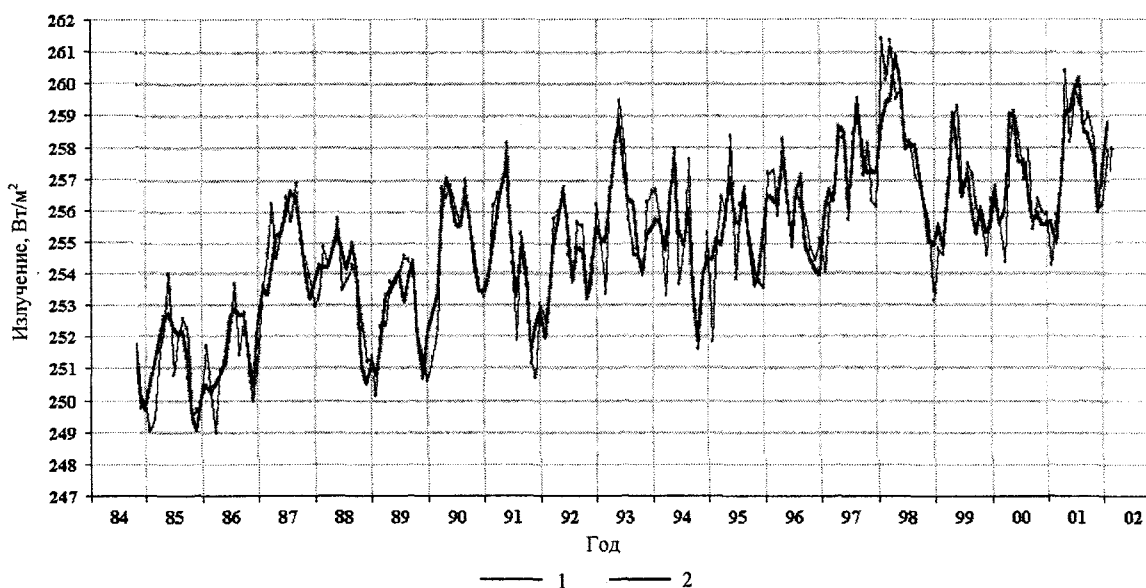


Рис.2. Исходный (по данным измерений) временной ряд ДВ-составляющей РБЗ (кривая 1) и восстановленный ряд на основе математической модели АСС (кривая 2)

анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы, соответствующей временному ряду, представленному на рис.1, был выбран 21 главный компонент (ГК). Затем проводился ретропрогноз ряда по участку с ноября 1984 г. по февраль 2002 г. Форма прогнозируемого ряда практически полностью воспроизводит форму исходного, однако, имеется некоторое рас-

хождение в деталях. Одномерный временной ряд, восстановленный по этим информативным ГК, показан на рис.2.

Применение данного метода оказалось весьма эффективным при отыскании в последовательности временного ряда скрытых периодичностей с неизвестными периодами. Результаты анализа периодограмм показывают, что кроме очевидных сезонных изме-

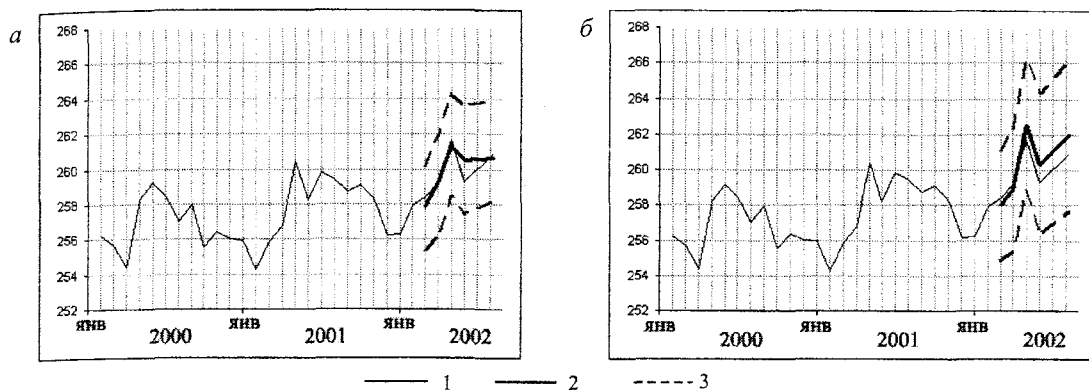


Рис.3. Исходный временной ряд длинноволновой составляющей РБЗ (кривая 1), прогноз по данным АСС (а) и АРПСС (б) моделей на март-июль 2002 г. (кривая 2) и 95-процентные доверительные интервалы (кривая 3)

нений с периодами в 12, 6, 4, 3 месяца, в изучаемых данных присутствуют гармоники, соответствующие периодам в 21, 26, 35, 52.5 месяца.

В качестве второго метода моделирования был использован метод построения модели авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). Для исследований была выбрана сезонная модификация этой модели, основанная на применении так называемых «упрощающих операторов». С помощью этого подхода (операторов $\Delta^k \nabla_T^k$) из анализируемого временного ряда $x(t)$ элиминируется нестационарность и временно исключается (в целях упрощения моделирования) сезонная составляющая с периодом T . В этом случае модель сезонного ряда имеет вид

$$\Delta^k \nabla_T^k x(t) = (1 - \theta F_-)(1 - \theta^* F_-^T) \delta(t),$$

где $\delta(t)$ – последовательность случайных величин, образующая белый шум с соответствующими статистическими характеристиками.

Обе математические модели использовались для прогнозирования значений ДВ-со-

ставляющей РБЗ в экваториальной зоне Земли. Эффективность прогноза, в первую очередь, зависит от горизонта l прогнозирования. Поскольку при $l < 3$ месяца прогноз обычно называется краткосрочным, при $3 < l < 6$ – среднесрочным, а ставилась задача оценки точности прогноза до 6 месяцев, то речь идет именно о среднесрочном прогнозе. Для построения статистических моделей использовались данные временного ряда по февраль 2002 г. включительно. В соответствии с этим для оценки точности прогноза были использованы результаты наблюдений с марта по июль 2002 г. На рис.3 приведены фрагменты исходного временного ряда, построенного по результатам спутниковых измерений, данные прогноза и 95-процентные доверительные интервалы. Данные рис.3 и таблицы свидетельствуют о высокой эффективности среднесрочного прогноза двумя рассмотренными методами. Оба подхода дают точность прогноза лучше 0,3 %. При этом следует заметить, что для достоверной идентификации климатических изменений требуется точность наблюдений около 0,5 %.

Точностные характеристики среднесрочного прогноза ДВ-составляющей РБЗ в тропической зоне, Вт/м²

Период прогноза в 2002 г.	Измеренные данные	Прогноз на основе АСС	Ошибка прогноза	Прогноз на основе АРПСС	Ошибка прогноза
Март	258,4	257,9	-0,54	258,4	-0,02
Апрель	259,2	259,2	0,04	258,9	-0,32
Май	261,7	261,3	-0,38	262,5	0,84
Июнь	259,3	260,5	1,19	260,4	1,06
Июль	260,9	260,7	-0,27	262,0	1,05

Если анализировать точность каждого метода в отдельности, то некоторое предпочтение следует отдать методу АСС, поскольку он, во-первых, дает несколько лучшую среднюю точность (0,62 против 0,78 Вт/м²) и, во-вторых, точность прогноза фактически не зависит от срока (в пределах полугода). Однако следует отметить, что метод АРПСС лучше воспроизводит реальный временной ход.

Результаты валидации разработанных математических моделей свидетельствуют о том, что выполненные исследования могут быть успешно использованы при решении задач изучения возникновения и последствий природных катастрофических явлений на основе систематизированных данных спутниковых наблюдений РБЗ и его отдельных компонентов.