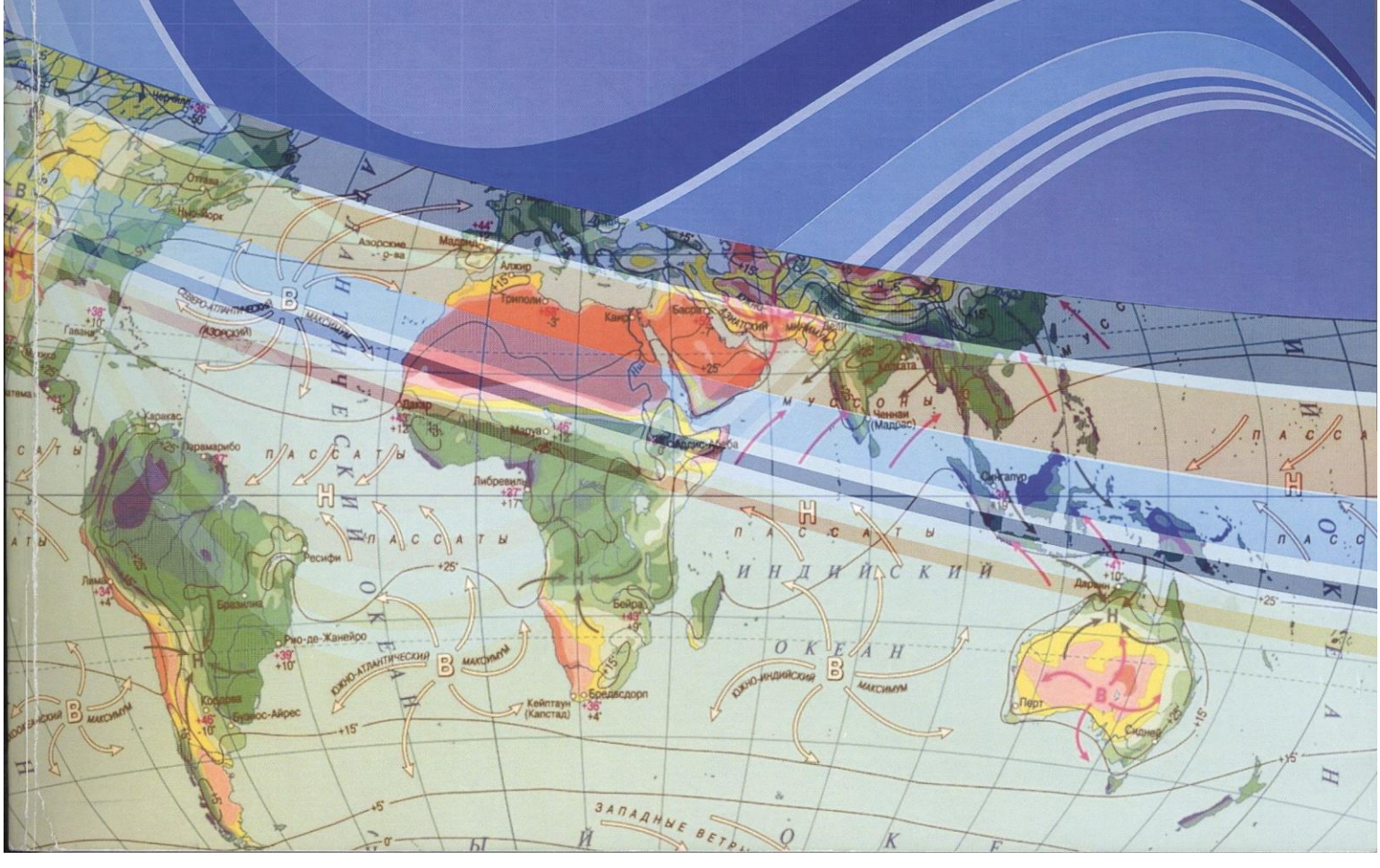
С. М. СТЕПАНЕНКО

Динаміка та моделювання клімату



УДК 551.51+551.58
ББК 26.23
С79

Видається за фінансової підтримки TEMPUS-проекту 2009-4977/001-001
«Development of qualification framework in meteorology»
(реєстр. № 159352-TEMPUS-FI-TEMPUS-JPHES)

Степаненко, С. М.

С79 Динаміка та моделювання клімату : підручник для студентів вищих навчальних закладів / С. М. Степаненко. — Одеса : Екологія, 2013. — 204 с.

ISBN 978—966—8740—90—9.

Викладається курс основ динаміки та моделювання глобального клімату. Перша глава присвячена загальним відомостям про властивості складових глобальної кліматичної системи. У другій главі наводяться сучасні дані про енергетику глобального клімату, гідрологічний та вуглецевий кругообіг у кліматичній системі. У третій главі викладаються основи моделювання глобальної кліматичної системи та її складових. Четверта глава присвячена опису сучасних уявлень про кількісні характеристики відгуку кліматичної системи на зовнішнє збурення. У п'ятій главі наводяться останні дослідження палеоклімату Землі та можливі фізичні та біогеохімічні механізми та зв'язки, які впливали та впливають на зміни глобального клімату. У шостій главі викладаються сучасні погляди на майбутні зміни клімату у відповідності з 4-ю оціночною доповіддю Міжурядової комісії по змінам клімату (IPCC).

У якості додатка до підручника включена доповідь «Копенгагенський діагноз, 2009», яка містить огляд наукових досліджень та концепцій, сформованих після виходу 4-ї доповіді IPCC.

Підручник призначається в першу чергу для підготовки студентів за спеціальністю «Кліматологія» на освітньо-кваліфікаційних рівнях «спеціаліст» і «магістр», та буде корисним для студентів та аспірантів, які навчаються за природничими напрямами підготовки, розробки навчальних курсів з питань запобігання наслідків та адаптації до змін клімату а також, особливо в останній частині, для всіх, хто цікавиться проблемами змін клімату.

УДК 551.51+551.58
ББК 26.23

ISBN 978—966—8740—90—9

© Степаненко С. М., 2013
© Одеський державний екологічний університет, 2013

Зміст

Передмова 5
Позначення і скорочення 7

Розділ 1. Опис кліматичної системи та її складових

1.1 Вступ 10
1.2 Атмосфера 13
1.2.1 Газовий склад і температура 13
1.2.2 Елементи загальної циркуляції атмосфери 15
1.2.3 Опади 18
1.3 Океан 19
1.3.1 Склад і властивості 19
1.3.2 Океанічна циркуляція 20
1.3.3 Температура і солоність 22
1.3.3.1 Поверхневий шар 22
1.3.3.2 Проміжні та глибокі шари 24
1.4 Кріосфера 25
1.4.1 Складові кріосфери 25
1.4.2 Властивості кріосфери 29
1.5 Поверхня суші та земна біосфера 29

Використана література та література для поглибленого вивчення 32

Питання для самоперевірки 32

Розділ 2. Енергетичний баланс, гідрологічний і вуглецевий колообіги

2.1 Енергетичний баланс Землі 34
2.1.1 Баланс тепла на верхній межі атмосфери: глобальний підхід 34
2.1.2 Парниковий ефект 36
2.1.3 Сучасна інсоляція на верхній межі атмосфери 38
2.1.3.1 Орбіта Землі 38
2.1.3.2 Обчислення зенітного кута 39
2.1.3.3 Добова інсоляція на верхній межі атмосфери 41
2.1.4 Енергетичний баланс на верхній межі атмосфери: географічний розподіл 42
2.1.5 Накопичення та перенос тепла 44
2.1.5.1 Акумуляція тепла 45
2.1.5.2 Перенос тепла 46
2.1.6 Баланс тепла на підстильній поверхні . . . 48
2.2 Гідрологічний цикл 50
2.3 Вуглецевий цикл 52
2.3.1 Короткий огляд сучасного стану 52
2.3.2 Океанський вуглецевий цикл 54
2.3.2.1 Неорганічний вуглецевий цикл 54
2.3.2.2 Біологічні конвеєри 56
2.3.3 Вуглецевий цикл на суші 57
2.3.4 Геологічні резервуари 57

Використана література та література для поглибленого вивчення 58

Питання для самоперевірки 59

Вправи для самостійної роботи 60

Розділ 3. Основи моделювання кліматичної системи

3.1 Вступ 61
3.1.1 Що таке кліматична модель? 61
3.1.2 Види кліматичних моделей 62
3.2 Ієрархія кліматичних моделей 64
3.2.1 Енергобалансові моделі 64
3.2.2 Моделі проміжної складності 65
3.2.3 Моделі загальної циркуляції 66
3.3 Опис компонентів кліматичної моделі 67
3.3.1 Атмосфера 67
3.3.2 Океан 67
3.3.3 Морська крига 68
3.3.4 Поверхня суші 69
3.3.5 Морська біогеохімія 71
3.3.6 Льодяні щити 72
3.3.7 Об'єднання між компонентами — моделі системи Земля 73
3.4 Числове розв'язання рівнянь 74
3.4.1 Сумісність, збіжність і стійкість 74
3.4.2 Дискретизація у часі та просторі за допомогою скінченних різниць 76
3.4.3 Спектральне представлення і методи скінченних елементів 77
3.5 Тестування достовірності моделей 78
3.5.1 Перевірка, валідація, тестування 78
3.5.2 Оцінювання результатів моделювання . . . 81

Використана література та література для поглибленого вивчення 82

Питання для самоперевірки 83

Розділ 4. Відгук кліматичної системи на збурення

4.1 Кліматичний форсинг і відгук кліматичної системи 84

4.1.1 Визначення радіаційного форсингу 84
4.1.2 Головні радіаційні форсинги 85
4.1.2.1 Парникові гази 85
4.1.2.2 Аерозолі 86
4.1.2.3 Зміни у землекористуванні 88
4.1.2.4 Зміни, зумовлені коливаннями сонячної сталої та вулканічною діяльністю . . 89
4.1.3 Рівноважний відгук кліматичної системи — визначення зворотного зв'язку 90
4.1.4 Перехідний відгук кліматичної системи . . 92
4.2 Прямі фізичні зворотні зв'язки 93
4.2.1 Зворотний зв'язок, пов'язаний з водяною парою, та градієнтний зворотний зв'язок 93
4.2.2 Зворотний зв'язок, пов'язаний з хмарністю 94
4.2.3 Кріосферні зворотні зв'язки 95
4.3 Геохімічні, біогеохімічні та біогеофізичні зворотні зв'язки 97
4.3.1 Компенсація карбонату 97
4.3.2 Взаємозв'язки між тектонікою плит, кліматом і вуглецевим циклом 99
4.3.3 Взаємозв'язки між кліматом і біосферою Землі 100

Використана література та література для поглибленого вивчення 101

Питання для самоперевірки 101

Розділ 5. Короткий огляд історії клімату: причини і механізми кліматичних змін

5.1 Вступ 103
5.2 Внутрішня мінливість клімату 105
5.2.1 Ель-Ніньо — Південне коливання 105
5.2.2 Північноатлантичне коливання 107
5.2.3 Південна кільцева мода 109
5.3 Історія клімату, починаючи з часу формування Землі 110
5.3.1 Докембрійський клімат 110
5.3.2 Клімат Фанерозою 112
5.3.3 Кайнозойський клімат 114
5.4 Останній мільйон минулих років: льодовикові—міжльодовикові цикли 116
5.4.1 Коливання орбітальних параметрів та інсоляції 116
5.4.2 Орбітальна теорія палеокліматів 119
5.4.3 Льодовикові—міжльодовикові варіації концентрації CO_2 в атмосфері 122
5.5 Голоцен і останні 1000 років 123
5.5.1 Поточний міжльодовиковий період 123
5.5.2 Останні 1000 років 125
5.5.2.1 Зміни півсферичного масштабу 125
5.5.2.2 Зміни регіонального масштабу 128
5.5.3 Останнє століття 129

Використана література та література для поглибленого вивчення 133

Питання для самоперевірки 135

Розділ 6. Можливі зміни клімату у майбутньому

6.1 Сценарії викидів 137
6.1.1 Мета сценаріїв та їх розробка 137
6.1.2 Спеціальний звіт по сценаріях викидів . 138
6.1.3 Характерні траєкторії змін концентрації 140
6.2 Проекції клімату на XXI століття 142
6.2.1 Зміни глобальної середньої приземної температури 142
6.2.2 Просторовий розподіл змін приземної температури і опадів 144
6.2.3 Зміни льодяного покриву та циркуляції в океанах та морях 146
6.2.4 Зміни у вуглецевому циклі і зворотних зв'язках вуглець-клімат 148
6.3 Довготривалі зміни клімату 152
6.3.1 Вуглецевий цикл 152
6.3.2 Зміни рівня моря і площі льодяних щитів 154

Використана література та література для поглибленого вивчення 157

Питання для самоперевірки 158

Додаток. **Копенгагенський діагноз.** Огляд останніх досягнень науки про клімат 160

Вступ 161
Загальне резюме: Останні найважливіші результати досліджень змін клімату 161
Розділ 1. Парникові гази і вуглецевий цикл 162
Розділ 2. Атмосфера 164
Розділ 3. Екстремальні явища 168
Розділ 4. Поверхня суші 171
Розділ 5. Вічна мерзлота і метаногідрати 173
Розділ 6. Льодовики і крижані шапки гір 174
Розділ 7. Льодяні щити Гренландії й Антарктиди 175
Розділ 8. Шельфовий лід 178
Розділ 9. Морська крига 179
Розділ 10. Океан 182
Розділ 11. Різкі зміни і критичні точки 186
Розділ 12. Уроки минулого 190
Розділ 13. Майбутнє 193
Використана література 196