

УДК 504.064.2.001.18+504.45.058

КП 072.19.19-00.00

№ держреєстрації 0117U007162

Інв.№

Міністерство екології та природних ресурсів України
НДУ "Український науковий центр екології моря" (УкрНЦЕМ)
65009, м. Одеса, Французький бульвар, 89
тел. (0482) 636–622, факс. (0482) 636–673, e-mail: aceem@te.net.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор УкрНЦЕМ

канд. геогр. наук., старш. наук. співроб.

_____ В. М. Коморін

« _____ » _____ 2018 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО–ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Моделювання впливу кліматичних змін на екосистему Південного океану як
основа для сталого невиснажливого користування живих ресурсів Антарктики

Науковий керівник

директор УкрНЦЕМ

канд. геогр. наук., старш. наук. співроб.

_____ Коморін В. М.

27 грудня 2018 р.

2017

Рукопис закінчено 27 грудня 2017 р.

Результати цієї роботи розглянуто Вченою Радою УкрНЦЕМ, протокол
від 15 січня 2018 №1

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник, директор УкрНЦЕМ, канд. геогр. наук, старш. наук. співроб.	_____ (підпис)	В. М. Коморін (вступ; розділи 1; 2; 3; 4; висновки)
Відповідальний виконавець, наук. співроб. відділу наукових досліджень морського середовища	_____ (підпис)	Г. О. Єрофеев (розділ 3)
Наук. співроб., завідуючий сектору інформаційної підтримки та зв'язку з громадськістю МЕАЦ	_____ (підпис)	Л. Г. Комарова (розділ 2)
Наук. співроб. сектору гідрофізичних досліджень відділу наукових досліджень морського середовища	_____ (підпис)	Є. О. Дикий (розділ 1, 4)
Мол. наук. співроб. сектору досліджень атмосферного забруднення приморських територій відділу наукових основ морського природокористування, екологічної експертизи та аудиту	_____ (підпис)	Ю. О. Котельнікова (розділи 1, 4)
Наук. співроб. відділу аналітичних досліджень та організації моніторингу	_____ (підпис)	Т. В. Сіблева (нормоконтроль)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 124 с., 2 табл., 15 рис., 90 джерел.

АНТАРКТИКА, КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НЕВИСНАЖЛИВЕ КОРИСТУВАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ПІВДЕННИЙ ОКЕАН, ПРОГНОЗУВАННЯ.

Об'єктами дослідження є екосистеми Південного океану. Предметом дослідження є показники стану екосистем океану.

Метою НДР є підготовка рекомендацій щодо моделювання впливу кліматичних змін на екосистему Південного океану для сталого використання живих ресурсів.

Методами дослідження є порівняльний аналіз та метод математичного моделювання динаміки стану екосистем океану.

Для досягнення мети були вирішені наступні завдання:

- аналіз стану природних ресурсів та механізмів їх збереження в Південному океані;
- аналіз сценаріїв кліматичних змін, що впливають на довкілля Південного океану;
- аналіз достатності існуючих міжнародних інформаційних систем та математичних моделей для діагнозу та прогнозу динаміки екосистем Південного океану;
- підготовка рекомендацій щодо моделювання екосистем Південного океану з урахуванням впливу кліматичних змін для сталого використання живих ресурсів.

ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень та умовних позначок.....	6
Вступ.....	9
1 Природні ресурси південного океану та механізми їх збереження.....	12
1.1 Основна характеристика природних ресурсів Південного океану.....	12
1.2 Засоби збереження живих ресурсів Антарктики.....	28
1.3 Екосистемний підхід до управління.....	30
1.4 Ведення боротьби з незаконним, незареєстрованим і нерегульованим промислом.....	31
1.5 Створення морських охоронюваних районів в Південному океані.....	32
1.6 Скорочення смертності морських птахів.....	33
1.7 Створення Програми з моніторингу екосистеми Комісією зі збереження морських живих ресурсів Антарктики.....	34
1.8 Управління уразливими морськими екосистемами.....	34
1.9 Програма з моніторингу екосистеми Комісії зі збереження морських живих ресурсів Антарктики - стандартні методи.....	35
1.10 Представлення даних моніторингу.....	37
1.11 Охорона ділянок Програми з моніторингу екосистеми Комісії зі збереження морських живих ресурсів Антарктики.....	38
2 Вплив кліматичних змін на довкілля південного океану.....	39
2.1 Прогнозування кліматичних змін в Антарктиці за допомогою математичних моделей.....	39
2.2 Вразливість екосистем Південного океану до зміни клімату.....	45
3 Аналіз інформаційних систем та математичних моделей для діагнозу та прогнозу динаміки екосистем Південного океану.....	52
3.1 Інформаційні системи спостереження за Південним океаном.....	53
3.2 Моделі динаміки чисельності та біомаси промислових популяцій риб.....	58

3.3	Моделі програмного забезпечення для екологічного/екосистемного моделювання.....	74
3.4	Екосистемна модель «АТЛАНТИС».....	85
3.4.1	Моделіні рівняння «основних продуцентів».....	88
4	Рекомендації щодо моделювання екосистем Південного океану з урахуванням впливу кліматичних змін для сталого використання живих ресурсів.....	96
4.1	Дослідження основних екосистемних процесів у Південному океані.....	99
4.2	Вивчення структури харчового ланцюга та функціонування Південного океану.....	100
4.3	Розвиток математичного моделювання в методологічному та технологічному аспектах.....	102
4.4	Розробка системи прогнозування морських харчових ланцюгів Південного океану.....	106
	Висновки.....	108
	Перелік джерел посилання.....	115

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

АНТКОМ	– Комісія зі збереження морських живих ресурсів Антарктики
АПВ	– Антарктичні проміжні води
АЦТ	– Антарктична циркумполярна течія
ВПА	– Віртуально-популяційний аналіз
ГІС	– Геоінформаційні системи
ЗАП	– Західна частина Антарктичного півострова
КНДА	– Консультативна нарада з Договору про Антарктику
МГО	– Міжнародна гідрографічна організація
МДС	– Моделі динамічних систем
МЕ	– Моделі всієї екосистеми
МК	– Метод Монте-Карло
МОР	– Морські охоронювані райони
МРМ	– Мінімально реалістичні моделі
НДР	– Науково-дослідна робота
ННН	– Незаконний, незареєстрований, нерегульований промисел
ОКРА	– Особливо керовані райони Антарктики
ООРА	– Особливо охоронювані райони Антарктики
ПОАМ	– Південно-океанічна акустична мережа
ПКР	– Південний кільцевий режим
ПО	– Південний океан
T_{min}	– Температурний мінімум
УМЕ	– Уразливі морські екосистеми
АССЕ	– Доповідь з питань зміни клімату та охорони навколишнього середовища Антарктики (Antarctic Climate Change and the Environment Report)
AntEco	– Біологічна програма «Стан Антарктичних екосистем»

- AnT-ERA – Біологічна програма «Антарктичні пороги – стійкість та адаптація екосистем»
- BAS – Британська антарктична служба
- CEMP – Програма АНТКОМ з моніторингу екосистеми
- CMIP5 – Подвоєна модель взаємопорівнюваної фази проекту 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)
- CPUE – Вилов на одиницю зусиль (catch-per-unit-effort)
- CSIRO – Державне об'єднання наукових і прикладних досліджень
- ECOPATH – Статичний, масово-збалансований знімок системи
- ECOSIM – Компонент динамічного моделювання часу для дослідження політики
- ECOSPACE – Просторово-часовий динамічний компонент, призначений
- EOV's – Основні океанічні змінні
- EwE – Безкоштовний набір програмного забезпечення для екологічного (екосистемного) моделювання («ECOPATH with ECOSIM»)
- ICES WGFASST – Міжнародна рада з дослідження моря Робочої групи з акустики рибної промисловості, науки та технологій
- IMAS – Інститут морських та антарктичних досліджень
- IMOS – Інтегрована система морського спостереження
- IMR – Інститут морських досліджень Норвегії
- IRD – Інститут досліджень розвитку Франції
- MESOPP – Проект «Мезопелагічної здобичі та хижаків Південного океану»
- MODIS – Спектрорадіометр середньо-роздільної здатності
- MSVPA – Багатовидовий аналіз віртуальних популяцій (MultiSpecies Virtual Population Analysis)
- MSY – Максимальний врівноважений вилов
- NOAA – Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США

ROMS	– Регіональна система моделювання океану
SAS	– Південно-Атлантична наукова база даних зворотного розсіяного акустичного випромінювання
SCAR	– Науковий комітет з антарктичних досліджень (Scientific Committee on Antarctic Research)
SCIC	– Постійний комітет щодо виконання та дотримання (Standing Committee on Implementation and Compliance)
SCOR	– Науковий комітет з досліджень океану
SOOS	– Система спостереження за Південним океаном
SONA	– Південноокеанічна мережа акустики
SS	– Квадратичні відхилення
TACs	– Загальні допустимі вилови (Total Allowable Catches)
WG-EMM	– Робоча група з моніторингу та управління екосистемами (Working Group on Ecosystem Monitoring and Management)
WOCE	– Експеримент з вивчення циркуляції Світового океану (World Ocean Circulation Experiment)

ВСТУП

Історично, Світовий океан поділяється на чотири океани: Атлантичний, Тихий, Індійський та Арктичний. Однак більшість країн, включаючи Україну – зараз визнають Південний (Антарктику) п'ятим океаном. Південний океан є «найновішим» названим океаном. Він визначається як водне тіло, що простягається від узбережжя Антарктиди до лінії широти 60° на Південь. Межі цього океану були запропоновані Міжнародною гідрографічною організацією (МГО) у 2000 році. Однак, так як не всі країни погодились з цим, межі поки не ратифіковані членами МГО. Україна є також членом МГО згідно Постанови Кабінету Міністрів України від 24.02.1995 № 143 «Про приєднання до Конвенції Міжнародної гідрографічної організації».

Морські екосистеми є невід'ємною частиною здоров'я нашої планети та людства. Як найбільша екосистема Землі, Світовий океан дає нам величезну різноманітність життєво-важливих «послуг», від поглинання атмосферного вуглецю до надання основного джерела живлення та природних ресурсів. Ці екосистеми змінюються і продовжать змінюватися протягом найближчого століття, оскільки зміна клімату, окислення океану та комерційний тиск продовжують впливати на середовища існування в океані. Мінімізація таких впливів на екосистемні послуги є одним з викликів для урядів країн та міжнародних організацій. Іншим, подальшим та важливим викликом є визначення того, яким чином політичні та нормативні положення можуть знадобитися для своєчасної адаптації до можливих впливів, таким чином, щоб втримати стійкість цих екосистем, зберегти екосистемні послуги та, при достатньому попередженні, мінімізувати стрімкі потрясіння, в процесі використання цих екосистем.

Зміна клімату створює значні труднощі для представників державних структур та менеджерів, ніж звичайні форми управління навколишнім середовищем, оскільки наслідки дій не відображаються миттєво чи навіть у найближчому майбутньому. Досвід щодо темпів відновлення озонової діри та

пов'язані з цим зміни екосистем дозволяє припустити, що екосистеми потребуватимуть багатьох десятиліть, щоб змінитися у відповідь на зміни від викидів парникових газів.

Щоб забезпечити підтримку екосистемних послуг в умовах майбутніх змін, ми потребуємо:

- надійні індикатори раннього попередження змін;
- надійну оцінку імовірності різних майбутніх станів екосистемних послуг з урахуванням різних варіантів управління або сценаріїв;
- механізми регулювання варіантів управління з урахуванням нової інформації.

В даній роботі представлено, яким чином ці три потреби можуть бути виконані для екосистем Південного океану, шляхом використання математичних моделей морських екосистем. Південний океан є віддаленим від більшості населення Світу, але з кінця 18 ст. привернув увагу у питанні заготівельних робіт, наукових досліджень, дикої природи та, зовсім недавно, щодо питання його збереження. Південний океан не менш важливий, ніж інші океанічні басейни – більш того він може бути використаний в якості моделі підтримки екосистемних послуг та адаптації до кліматичних змін в інших місцях світу [1].

Саме тому метою науково-дослідної роботи (НДР) була підготовка рекомендацій щодо моделювання впливу кліматичних змін на екосистему Південного океану для сталого використання живих ресурсів.

Для досягнення мети повинні бути вирішені наступні завдання:

- аналіз стану природних ресурсів Південного океану та механізмів їх збереження;
- аналіз сценаріїв кліматичних змін, що впливають на довкілля Південного океану;
- аналіз достатності існуючих міжнародних інформаційних систем та математичних моделей для діагнозу та прогнозу динаміки екосистем Південного океану;

– підготовка рекомендацій щодо моделювання екосистем Південного Океану з урахуванням впливу кліматичних змін для сталого використання живих ресурсів.

Об'єктами дослідження стали екосистеми Південного океану. Предметом дослідження – показники стану екосистем океану. Серед методів дослідження були використані порівняльний аналіз та метод математичного моделювання динаміки стану екосистем океану.

1 ПРИРОДНІ РЕСУРСИ ПІВДЕННОГО ОКЕАНУ ТА МЕХАНІЗМИ ЇХ ЗБЕРЕЖЕННЯ

1.1 Основна характеристика природних ресурсів Південного океану

Розуміння та прогнозування того, як Південний океан реагує на зміни, є глобальним актуальним питанням, яке вимагає аналізів циркумполярного масштабу.

Постійні мультидисциплінарні спостереження необхідні для виявлення, інтерпретації та реагування на зміни. Ключовим є розуміння базових рівнів циркуляції та гідрографії океану, а також первинної та вторинної продуктивності, оскільки від цих базових рівнів можуть бути визначені дані зміни.

Завдяки програмам глобальних спостережень, зокрема Програмі «Експеримент з вивчення циркуляції Світового океану» (WOCE) – «World Ocean Circulation Experiment», був проведений синтез глобальних спостережень за температурою, солоністю, концентрацією кисню та поверхневим хлорофілом. Проте, незважаючи на їх широке просторово-часове поширення, значну кількість, і ключове значення для біогеохімічного циклу океану, а також розподілу та поширеності вищих хижаків, інформація про широкомасштабний розподіл середньо-трофічних рівнів є значно відсталою.

Організми середньо-трофічних рівнів розподіляються по розмірах від планктону (< 2 см), який дрейфує за течіями, до великого нектону (> 10 см), який має можливість вільно пересуватись. Вони є таксономічно різноманітною групою, до якої належать головоногі молюски, желеподібні організми, евфаузиди та мезопелагічна риба (див. рис. 1). Вони відіграють важливу роль в екосистемах Південного океану, рухаючи біомасу та енергію через харчовий ланцюг від основних продуцентів до хижаків.

Акустичні методи є засобом для збору даних високої роздільної здатності, від малих до великих просторових і часових масштабів ключових середньо-трофічних видів і/або функціональних груп з числа різних платформ. Проте

акустичні вимірювання не можуть використовуватись без систем стандартизації, відповідної достовірності та кількісної оцінки базових зв'язків між біологічними змінними, що представляють інтерес, та акустичною енергією.

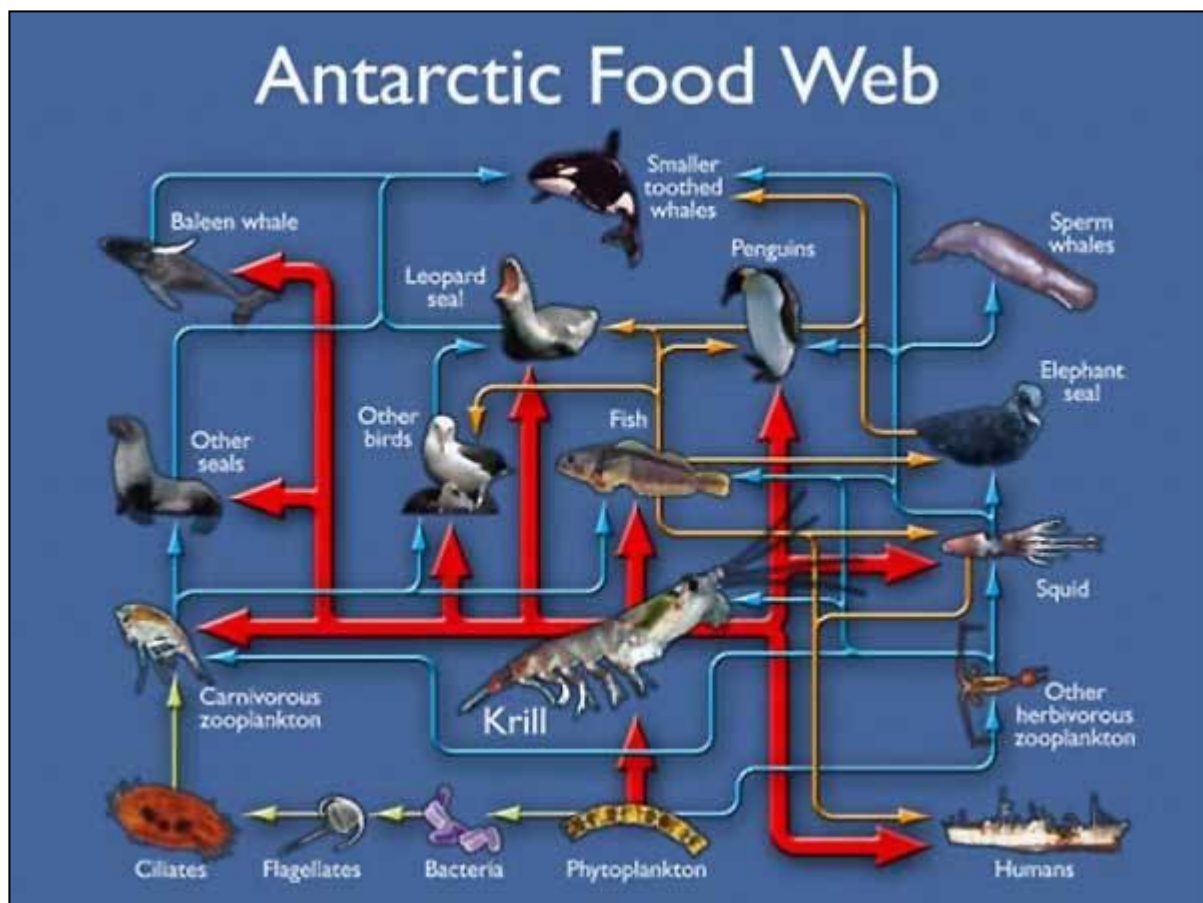


Рисунок 1 – Антарктичний харчовий ланцюг. Зображення надано Антарктичним управлінням Великобританії [2]

З цією метою необхідна систематична та довгострокова стратегія для створення акустичної програми відбору проб, яка включає в себе впровадження стандартів та протоколів для порівняння екосистем басейнових масштабів, яка координується через міжнародні організації та програми. Південно-океанічна акустична мережа (ПОАМ) спрямована на вирішення цього.

Південно-океанічні екосистеми мають важливе значення на глобальному та регіональному рівнях. Південний океан (ПО) визначається як водний простір на півдні субтропічного фронту (див. рис. 2), що є важливим у системі Землі, і

відповідає за близько 40 % поглинання антропогенного CO₂ від загального обсягу Всесвітнього океану. До 18 століття він був найбільш значущим регіоном, який підтримував морських ссавців і був домом для більшості видів альбатросів та пінгвінів. ПО також має дуже короткий харчовий ланцюг, який підтримує вищих хижаків.

Історично експлуатація біоти викликала значні зміни, і, швидше за все, залишатиметься з домінуванням людської діяльності в межах регіону на десятиліття вперед. В даний час рибний промисел в регіоні націлений на антарктичний криль, патагонського та антарктичного кликача та льодяну рибу – макрель. Антарктичний криль є найбільш вірогідним видом, що підтримує дуже високі вилови в регіоні, хоча рибний промисел в даний час працює на низькому рівні (приблизно 2 % від загального обсягу вилову), проте поступово збільшується. Цей рибний промисел може стати одним із 10 найбільших промислів дикої риби в світі з позиції виробництва біомаси. Ліміти вилову для антарктичного крилю в даний час встановлені Комісією зі збереження морських живих ресурсів Антарктики (АНТКОМ), яка відповідає за збереження біоти та екосистем ПО і становить 8,695 млн. т. Ці оцінки на сьогодні вважаються екологічно стійкими, хоча все ще потрібні механізми, що дозволятимуть уникати локальних наслідків від рибальства, і при будь-яких майбутніх змінах у системі продуктивності вимагатимуть коригування обмежень по вилову. Ймовірно, що ліміти на вилов, зростуть виключно як результат покращення методів для оцінки чисельності від акустичних даних в процесі судноплавних досліджень. Якщо взяти в повному обсязі, то ліміт на рівень вилову становитиме 11 % від загального обсягу видобутку дикої риби у 2011 році (78,9 млн. т). На відміну від перуанського анчоуса, який в даний час є найбільшим одиничним видом по промислу риби, і становить лише 5 % від глобальних обсягів вивантаженої на берег риби.

Порівняльна простота екосистеми ПО дає можливість краще зрозуміти наслідки змін клімату на екосистемах великих масштабів, визначаючи позитивні та негативні зворотні реакції. Також, очікується, що різні ділянки ПО (див. рис. 2)

знаватимуть різних змін у фізичних середовищах існування, що дасть змогу здійснювати широкомасштабні порівняння реакцій екосистем на різні фізичні режими. Загалом, це покращить нашу здатність відстежувати та перевіряти моделі, які будуть використовуватися органами, відповідальними за формування політики, для прогнозування ймовірності різного майбутнього держав.

В подальшому, очікується, що полярні екосистеми зазнають істотних змін у фізичному середовищі в порівнянні з іншими регіонами земної кулі. Ранні зміни можуть використовуватися для запуску адаптаційних відповідей до неминучих змін у інших місцях.

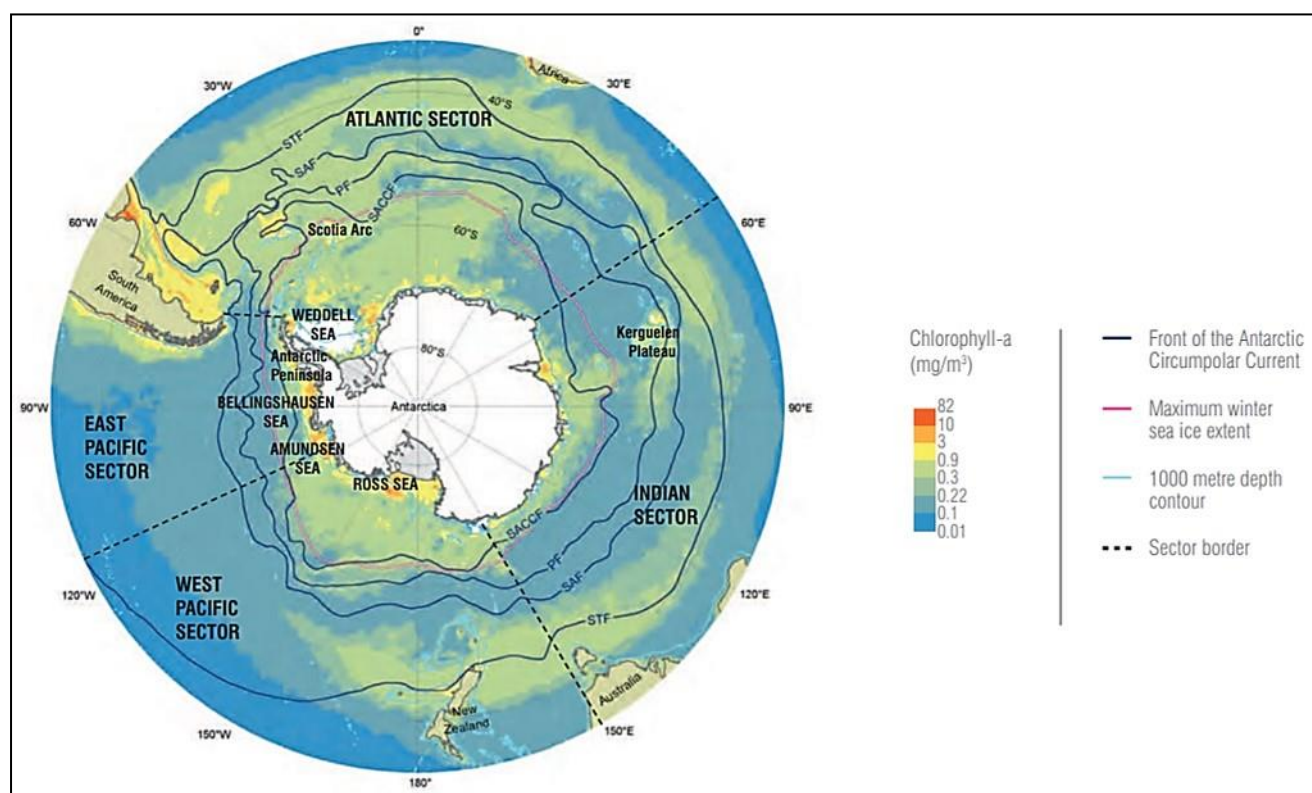


Рисунок 2 – Сектори Південного океану [2]

На рис. 2 представлені важливі фізичні характеристики, які формують екосистеми ПО, включаючи розміщення основних фронтальних характеристик (темно сині лінії) і морського крижаного покриву (рожева лінія показує середню максимальну протяжність зими протягом останніх 10 років). Ці фізичні

характеристики відіграють важливу роль у формуванні моделей продуктивності, про що свідчить при-поверхнева концентрація хлорофілу- α . Дані взяті із спектрорадіометра середньо-роздільної здатності MODIS, з використанням супутника EOS PM-1, який оцінював австралійські літні сезони між 2002/2003 та 2015/2016. Основні сектори можуть бути виділені, основууючись на відмінностях у фізичному середовищі, які зображені на рис. 2 пунктирними лініями [2].

Полярні екосистеми в даний час є найменш зміненими екосистемами на планеті – з точки зору прямого впливу поточної діяльності людини в регіоні, і можуть залишатися такими, якщо нинішні режими комплексного управління здатні відповідати вимогам щодо збереження змін екосистем у майбутньому. Це робить ПО ідеальною «лабораторією» для моніторингу наслідків змін клімату та окислення морських екосистем, якщо рибальство та інші види діяльності будуть впроваджуватися таким чином, щоб підтримувати наукові цінності цієї «лабораторії».

Біомаса видів, будь то фітопланктон або кити, залежить від їжі, яка споживається цим видом, даючи початок продукуванню (росту і розмноженню організму), та втрат біомаси через споживання хижаками чи інших факторів, які впливають на виживання та які можуть включати особливості цих середовищ існування або хвороби, тощо (див. рис. 3).

Організм споживає їжу доступну йому або виходячи зі своїх харчових переваг (як правило, менших організмів або, у випадку рослин, біогенні речовини з об'єму поживних речовин). Не вся їжа асимілюється в організмі. Відходи харчування звільняються у вигляді фекалій, які, залежно від їх розміру, можуть опускатися в глиб води, сприяючи секвестрації вуглецю або підживленню донних (бентосних) видів. Деякі відходи харчування можуть бути поглинені іншими організмами та/або перероблені в розчинений об'єм поживних речовини бактеріями. Азотовмісні метаболічні відходи розчіпляються в об'ємі поживних речовин. Організм може споживатися вищими хижаками або зазнавати смерті від інших агентів. Комбінований результат всіх трофічних взаємодій, показаний сірими стрілками, є енергетичними шляхами, що складають харчові ланцюги, які

відображені на рис. 4 та 6 [2]. Ці відносини не є статичними, навіть від години до години.

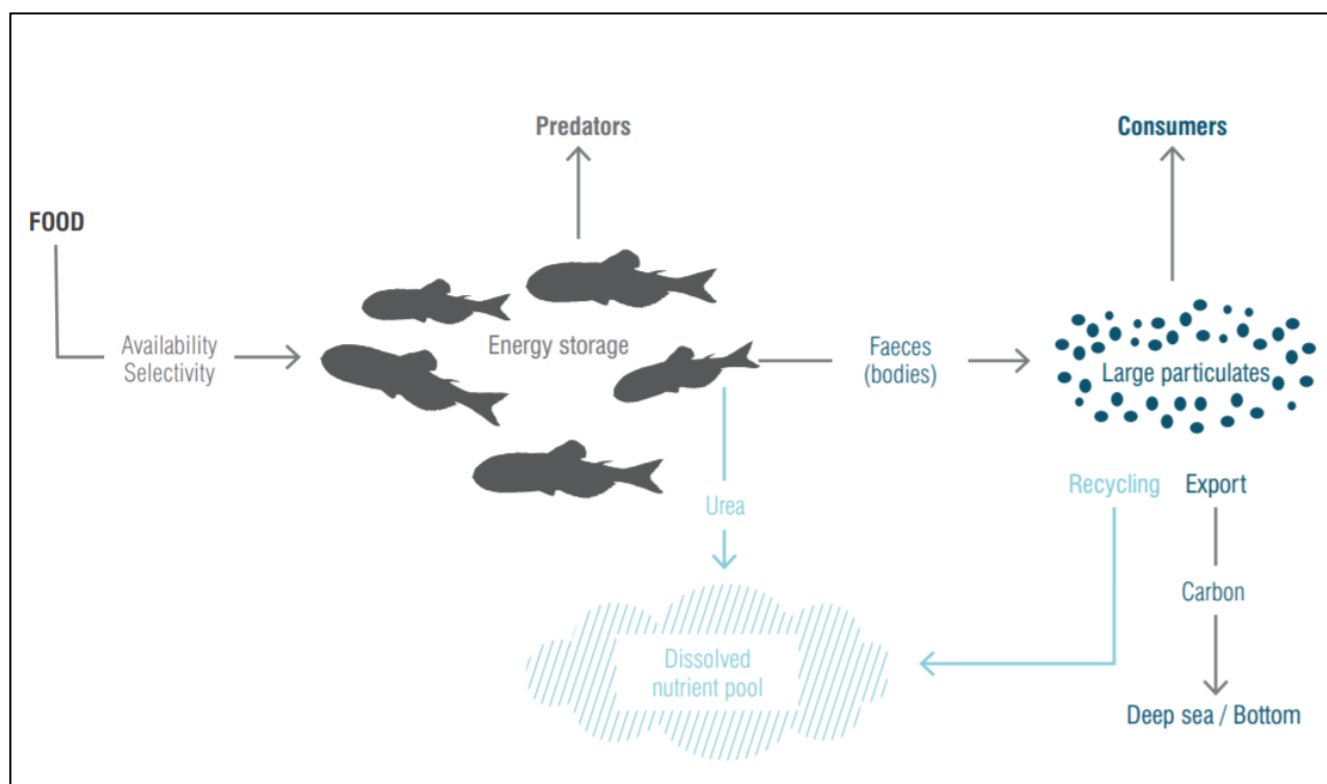


Рисунок 3 – Трофічний ланцюг в екосистемі Південного океану [2]

Екологічні фактори можуть сприяти деяким видам фітопланктону, над іншими, кожен з яких, у свою чергу, може бути сприятливим в якості їжі для різних травоядних тварин. Це може призвести до того, що енергія (вуглець) буде прив'язана до різних енергетичних шляхів через харчові ланцюги, керовані відносинами між хижаками та здобиччю (див. рис. 4).

Лівий шлях розглядається як ефективний шлях від біогенних речовин до найвищого трофічного рівня. Правий шлях є менш ефективним, з більш проміжним трофічним рівнем і з послідовною втратою енергії. Цей шлях також показує можливі зв'язки між бентосною (донною) та пелагічною (водний стовп, особливо епі- та мезо-пелагічний) ділянками екосистеми. Секвестрація вуглецю

відбувається, коли частинки занурюються у глиб води і не переробляються у пелагічному харчовому ланцюгу (див. рис. 3) [2].

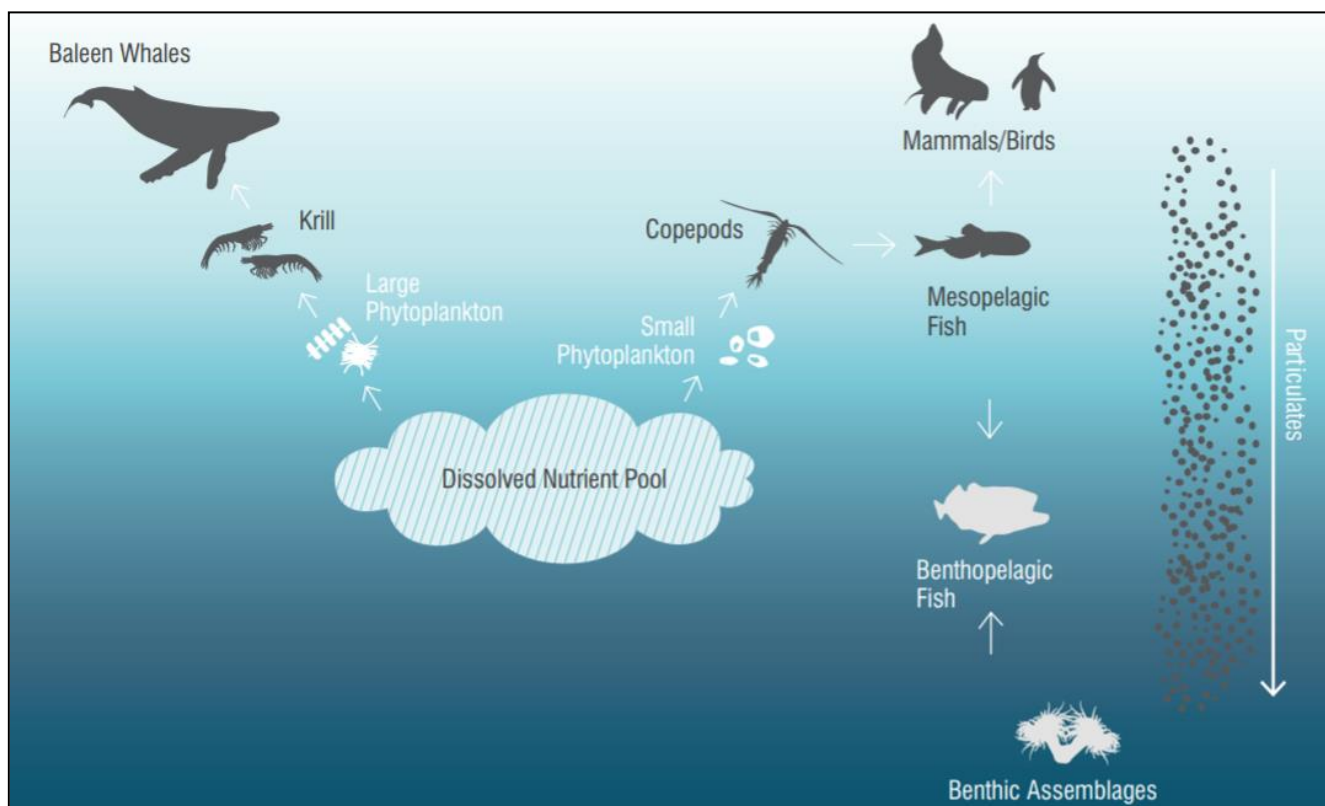


Рисунок 4 – Спрощена презентація ролі різних енергетичних шляхів в харчових ланцюгах та секвестрації вуглецю [2]

У минулому харчові ланцюги ПО вважалися відносно простими і переважали короткими трофічними шляхами перенесення первинної продукції до найвищих хижаків (китів) через криль. Проте зараз це визнається надмірним спрощенням для більшості ПО, і існує, як мінімум, ще один енергетичний шлях, який переміщує енергію від дрібного фітопланктону до вищих хижаків через веслоногих ракоподібних і маленьких мезопелагічних риб. Кликач, перш за все донні види, харчується мезопелагічною рибою та головоногими молюсками при вертикальних харчових міграціях. Вони також харчуються видами, що залежать від донних (бентосних) угруповань, які живляться детритним (дисперсним) дощем від поверхневих вод.

Відносно значення цих різних енергетичних шляхів у харчових ланцюгах має значні наслідки для управління ресурсами, зокрема, управління рибним промислом криля та кликача в ПО. Тому є чітка необхідність розуміння та прогнозування змін харчових ланцюгів для екосистем ПО. Наприклад, зміна питомої ваги цих енергетичних шляхів може свідчити про збільшення крилю та зменшення кликача або навпаки.

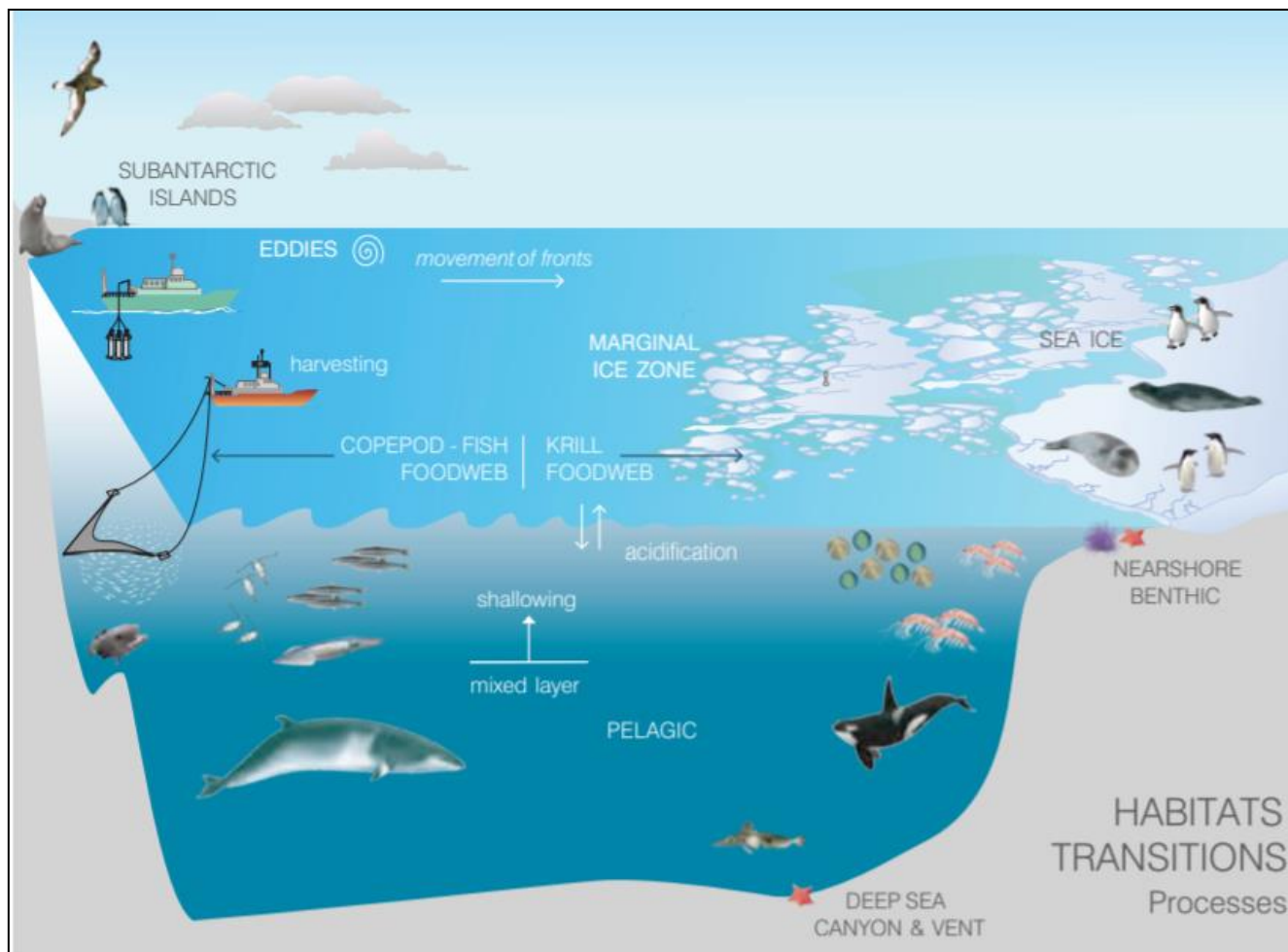
На додачу, при переміщенні через харчові ланцюги, вуглець може бути втрачений в глибинах моря (секвестрація). Це може виникнути через транспортування вуглекислого газу в воду та осадження раковин (молюсків/ракушок), тіл рослин або тварин (наприклад, туш китів), або викинутих відходів, таких як фекалії (див. рис. 3). Різні види будуть мати різну схильність сприяти поглинанню вуглецю, або через їхню ефективність у використанні поглиненого вуглецю або через можливості для їх відходів бути спожитими або переробленими в харчових ланцюгах (див. рис. 3).

Таким чином, продуктивність видів (їх здатність до зберігання енергії як біомаси) буде залежати від ефективності шляху розповсюдження, який забезпечує їх основне джерело енергії.

Загалом, динаміка важливих видів і секвестрація вуглецю будуть залежати від структури та функціонування харчових шляхів в цілому. Як ця динаміка може змінитися внаслідок змін клімату та окислення океану, буде залежати від того, яким чином види на різних трофічних рівнях будуть безпосередньо впливати на зміни середовищ існування.

Екосистеми ПО включають середовища існування, угруповання взаємодіючих видів та харчові ланцюги (див. рис. 5), які разом виконують функції чи процеси, які ми можемо розглядати як «екосистемні послуги» (наприклад, рибальство, секвестрація вуглецю, показники збереження). Домінуючі характеристики фізичного середовища, що визначають середовища існування ПО, включають Антарктичну циркумполярну течію (АЦТ) та її фронтальні системи, полярну сезонність та щорічний наступ і відступ морського льоду. Продуктивність фітопланктону міститься в межах області фронтальних систем,

причому найбільше продукування відбувається в поєднанні з неглибокими ділянками, пов'язаними з постачанням заліза. Біомаса фітопланктону, поряд з фізичними змінними, також є показником якості пелагічних середовищ існування.



Примітка. Субантарктика наліво та Антарктичний континент праворуч.

Рисунок 5 – Схематичне зображення ключових характеристик екосистем Південного океану [2]

Просторовий розподіл екосистем в ПО має широтну зональність з півдня на північ через переходи між континентальним шельфом Антарктиди, схилом, глибоким океаном і суб-антарктичними островами. Існує також поздовжня зональність, пов'язана з підполярними морями Ведделла і Росса, Дугою Скоша в південно-західній частині Атлантики, Кергеленським плато в індійському секторі, хребтом Маккуорі та підводними горами на північ від моря Росса в секторі




















західного району Тихого океану (див. рис. 2). На додачу до цієї топографічної багатокомпонентності є океанографічна багатокомпонентність, пов'язана з фронтами та зонами АЦТ, поточними системами морського шельфу, Північним субполярним циклонним круговоротом та широтною варіацією ряду інших факторів, найбільш помітних – температури, солоності та морського льоду. Взаємодія всіх цих чинників призводить до значної регіональної варіації в обох середовищах існування, так само як і у відмінностях впливу змін клімату на екосистеми.

В динаміці продуктивності та харчових ланцюгів в ПО переважають екстремальні сезонні коливання випромінювання та ходу морського льоду, разом з температурою, хімією карбонатів та освітленням через глибоке вертикальне змішування. Діатомові водорості є домінуючими первинними продуцентами, особливо в прибережних водах, а також є основними постачальниками вуглецю в регіоні до щорічного його потоку (див. рис. 6).

Екосистема переходить від харчових ланцюгів копеподових-риб на північ до харчових ланцюгів, в яких переважає антарктичний криль на півдні. У сезонному циклі переважає зміна умов освітлення та морського льоду. Майбутні зміни температури, вітру та окислення можуть призвести до обміління глибини шару перемішування навесні та влітку, руху на південь фронтів та більшої концентрації вуглекислого газу в поверхневих водах. Очікується, що гранична зона льоду зіткнеться з підвищенням температури, хоча вітер також може грати важливу роль у розподілі морського льоду. Відповідні зміни в різних організмах показані в таблиці 1 [2].

Вважається, що в антарктичних морських харчових ланцюгах (див. рис. 6) буде переважати антарктичний криль, дорослі особини розміром від 30 мм до 60 мм і протяжністю життя до семи років. Криль є домінантним споживачем великого фітопланктону (діатомові водорості) і невеликого зоопланктону, він також являється їжею для багатьох риб, кальмарів/головоногих молюсків, морських ссавців, пінгвінів і літаючих птахів у ПО.

Таблиця 1 - Узагальнення відомих прямих реакцій біоти на зміни у фізичних параметрах в Антарктиді та Південному океані* [2]

Taxon	Size (m)	UV	Temperature	Ocean acidification	Mixed Layer Depth	Sea-ice	Move with fronts	Eddies
Diatoms 	0.0005	↓	↑		↑	↓	↑	
Flagellates (Phaeocystis) 	0.0001	↑	↓		↓	↓	↑	
Microzooplankton 	0.001	?	↑	?		↓	↑	
Bacteria & viruses 	0.000001	↓	↑			↓	↑	
Zooplankton 	0.005-0.01		↑				↑	
Salps 	0.01-0.05					↓	↑	
Antarctic krill 	0.05	↓	↓ Sub-Antarctic	↓		↑		
Nototheniid fish 	0.1-0.5		↓					
Myctophid fish 	0.05-0.1		↑				↑	
Oegopsid squid 	0.05-5		↓?	↓?				
Southern Elephant seal 	2-5					?		↑
Krill-eating seals 	1-3				↓	↑?	↑	↑
King penguin 	1						↑	↑
Emperor penguin 	1.5					?		?
Adélie penguin 	0.7				?	↑ no ice to lower ice conditions ↓ heavy ice conditions		
Macaroni penguin 	0.7					↓		↑
Baleen Whales 	>10					?		?
Flying birds 	0.5-2					↑?	↑?	↑?
Benthic communities 	0.1-0.5		↓?	↓?				

*UV/УВ – ультрафіолетове випромінювання. Окислення включає зміну карбонатної хімії та рН. Морський лід включає розгляд товщини, концентрації та об'єму, без диференціювання фактору/ів, обумовлених зміною в кожній групі організмів. Стрілка вгору показує позитивний зв'язок (очікується, що збільшення у фізичній перемінній спричинить збільшення в таксоні). Стрілка вниз вказує на негативний зв'язок (очікується, що збільшення у фізичній перемінній

спричинить зменшення в таксоні). Знак питання «?» вказує на те, де може бути відповідь, але напрямок невизначений, тобто результат може бути змінним у просторі, часі або для конкретних таксонів, або докази є двозначними. Оскільки фізичні фактори варіюються в їх напрямі змін між різними секторами Південного Океану, відповіді в цій таблиці використовуються для інтерпретації того, що конкретні напрямки змін можуть означати для населення в певному секторі.

Інші вторинні продуценти (споживачі первинних продуцентів) – це сальпи та веслоногі ракоподібні. Останні харчуються меншим фітопланктоном і споживаються маленькими рибами, такими як Міктофові. Ланцюги харчування, де більшість первинної продукції досягає вищих трофічних рівнів через криль, веслоногих ракоподібних або сальп, представлені, відповідно, трьома енергетичними шляхами у цих харчових ланцюгах.

Відносна важливість криля змінюється регіонально. Вони переважають від моря Беллінсгаузена, на схід, до моря Ведделла і Атлантичного сектора ПО. У Індійському і південно-західному Тихоокеанському регіоні ПО система, де переважає криль, лежить на південь від південного кордону АЦТ, тоді як на півночі в системі переважають веслоногі ракоподібні (див. рис. 5). У холодних прибережних водах над континентальним шельфом, включно з шельфовими районами моря Росса, моря Ведделла та затоки Прюдс, серед вторинних продуцентів переважають льодяний криль (*Euphausia crystallorophias*), який менший, ніж антарктичний криль, і веслоногі ракоподібні.

Веслоногі ракоподібні також були знайдені в Атлантичному секторі, але їх відносне значення для харчових ланцюгів виходить на перший план лише, коли криль є в незначній кількості. Ці умови можуть також сприяти поширенню сальп.

На відкритій океанічній зоні (яка не покрита морським льодом взимку) Міктофові домінують над рибною фауною з розподілом, який показує високу ступінь кореляції з океанографічними характеристиками, зокрема фронтальними зонами, що діють як біогеографічні бар'єри. Ці риби являють собою середньо-трофічний рівень між мезозоопланктоном і багатьма вищими хижаками (морські птахи, морські ссавці, великі риби та кальмарами/головноногі молюски), і тому

мають важливий вплив на потоки енергії в цих харчових ланцюгах. Вони особливо важливі в суб-антарктичних водах Індійського сектору ПО.

Поточні зміни та тенденції в екосистемах ПО змінювалися як прямий результат впливу людини з моменту майже повного знищення антарктичних та субантарктичних тюленів, починаючи з 1800 років, продовжуючи до середини 20 століття надмірною експлуатацією багатьох видів китів та донних риб. ПО суттєво зміниться в найближчі десятиліття в результаті змін клімату та окислення океану.

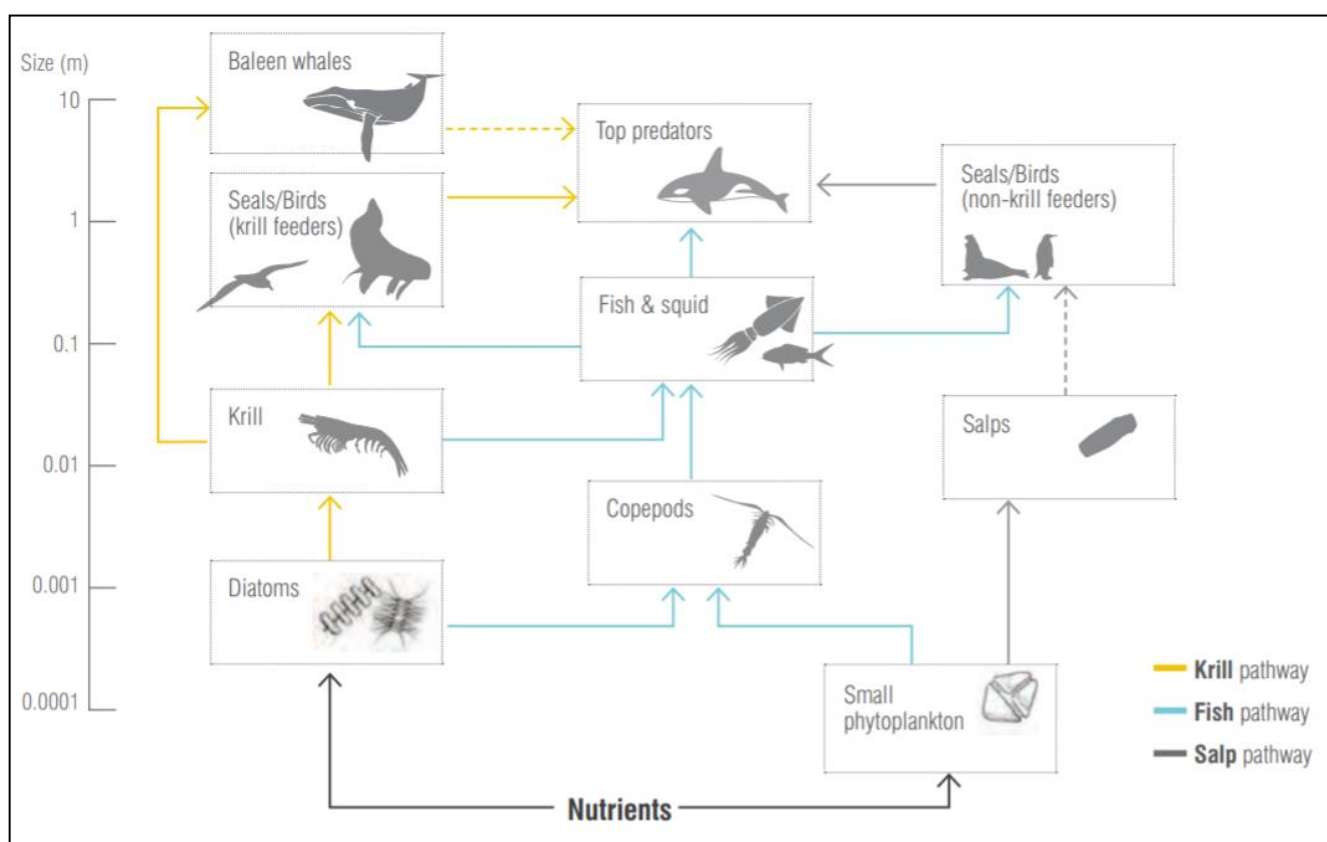


Рисунок 6 – Масштаби елементів харчового ланцюга та енергетичні потоки екосистеми Південного океану [2]

На рисунку 6 відображені різноманітні енергетичні шляхи, що базуються на первинних трав'яїдних тваринах – антарктичний криль (жовтий), веслоногі ракоподібні (синій) і сальпи (сірий). Складність харчового ланцюга ілюструє потенціал для деяких видів бути залежними від більш ніж одного шляху

розповсюдження. Штрихована сіра лінія вказує на те, що хижаки салп в даний час невідомі. Вертикальне розташування вказує приблизний розмір різних організмів: з найбільшими організмами у верхній частині і найменшим у нижній частині (розмір вимірюваної шкали до 10 позначки на панелі в лівій частині). Тут не вказані: внесок всіх організмів до об'єму поживних речовин та секвестрацію вуглецю через осідання всіх мертвих особин та викиди відходів (у регіональному масштабі від позитивного до негативного); різка втрата шельфових льодовиків; опріснення глибоководної води, яке вказує на опріснення поверхневої води; зсуви на південь у фронтах АЦТ, разом із зміною вихрових полів та збільшенням окислення океану [2].

Зміни в фізичному середовищі ПО формують зміни в середовищах проживання, які мають наслідки для різноманітності та морських харчових ланцюгів в Антарктиці. Як наслідок, очікується, що зміна клімату вплине більш ніж на первинну продукцію (фітопланктон); видова різноманітність, присутня у різних районах, змінюється через зміни в просторовій протяжності різних середовищ існування. Також, видозміна середовищ проживання в деяких районах означає, що взаємодії між хижаками та здобиччю можуть бути порушені на різних трофічних рівнях харчових ланцюгів, або продукування деяких видів може впливати на енергетичні витрати, пов'язані з проживанням у видозмінених середовищах існування (наприклад, зміни в морському льоді можуть змінити місця харчування для хижаків залежних від льоду). Таким чином, зміна клімату може призвести до змін у видовому різноманітті на нижчих трофічних рівнях, тим самим змінюючи продукування, яке досягає вищих трофічних рівнів. Це також може призвести до впливу на більш високі трофічні рівні, що змінить тиск хижаків на види більш низьких трофічних рівнів.

Хоча зміни в біоті були виявлені в останні десятиліття (див. табл. 1), механізми цих змін, як правило, недостатньо зрозумілі. Види, які живуть поблизу поверхні, включаючи зоопланктон, можуть мігрувати в південному напрямі, оскільки океан нагрівається, але регіональна географія та океанографія можуть зробити цю реакцію більш складною.

У морі Скоша, антарктичний криль, найкращий з вивчених пелагічних видів ПО, за оцінками знизився за щільністю, і це було пов'язано зі скороченням морського льоду, хоча ці розраховані зміни тепер оцінюються як частина мінливості в системі з плином часу. Перехід від харчового ланцюга на основі крилю до харчового ланцюга з веслоногих ракоподібних та риби в умовах низької кількості крилю, ймовірно, є результатом збіднілих місць існування та первинної продукції, доступної для крилю впродовж декількох років. Це дозволяє припустити, що якщо в майбутньому продовжуватиметься збереження збідніння місць існування, то харчовий ланцюг з веслоногих ракоподібних і риби може стати більш загальним. Загальний прогноз для антарктичного криля є неоднозначним, оскільки:

а) фактори, які можуть безпосередньо впливати на нього, варіюються на регіональному рівні;

б) даний вид крилю використовує різні особливості середовища проживання в різний час у своєму життєвому циклі (наприклад, личинки та мальки використовують як середовище існування взимку морський лід);

в) криль здатний адаптуватися до зміни умов фізіологічно та поведінково.

Нове дослідження також показує, що виживання личинок криля може негативно впливати на збільшення кислотності океану, додаючи додаткову складність до оцінювання.

Деякі ключові тенденції в розподілі та кількості популяцій птахів (пінгвіни та літаючі птахи) були пов'язані з впливом змін клімату, включаючи негативні реакції на більш теплі умови. Проте, первинні сили змін у вищих хижаків можуть мати складнощі в розумінні, так як вищі хижаки можуть, крім екстремальних випадків, мати гнучку поведінкову та/або репродуктивну реакцію до мінливості здобичі та нагульного ареалу. Це може означати, що реакції деяких популяцій можуть відставати від тенденцій серед здобичі чи середовищ проживання, і це можливо буде важко пов'язати з певною причиною, якщо одночасно змінюється багато факторів, так, як це може статися, коли зміни в середовищах існування впливають на різні трофічні рівні різними способами.

Труднощі з таким аналізом полягають у тому, що в даний час немає циркумполярних оцінок стану всіх основних таксономічних груп, хоча для деяких груп було досягнуто значного прогресу (наприклад, пінгвіни і тюлені), та через багато груп в деяких районах, таких як Антарктичний півострів та Дуга Скоша. Це ускладнює визначення того, що сталося з цими екосистемами загалом.

Вірогідність щодо майбутнього середовищ проживання в ПО, очікується, що океанські фронти будуть і надалі змінюватися з подальшим рухом на південь, потеплінням та опрісненням поверхневих вод і посиленням стратифікації. Ці зміни стануть результатом очікуваної інтенсифікації вітрів (через Південний кільцевий режим) та розширення на південь субтропічних круговоротів. Це також призведе до збільшення підйому теплих вод; солоності, води з великим змістом біогенних речовин, включно зі збільшення проникнення теплих Циркумполярних глибинних вод на Антарктичний континентальний шельф. Очікується, що морський лід скоротиться як у об'ємі, так і в річній тривалості, хоча моделі оцінки показують, що прогноз морського льоду залишається однією з найбільших невизначеностей, навколо середовищ існування ПО (досі існує деяка невідповідність між спостереженнями та модельними розрахунками обсягу морського льоду Антарктики). Подальше роздроблення шельфового льоду може мати місце, якщо рівень потепління на Антарктичному півострові відбуватиметься і в інших регіонах.

Очікується, що ці зміни в фізичних місцях існування призведуть до скорочення екосистем ПО в південному напрямі, зменшення крилю, разом зі змінами у вищих хижаків.

Прояви впливу змін клімату на екосистеми будуть варіюватися між секторами, з переходом на південь у середовищах проживання уздовж Антарктичного півострова, підвищенням умов для морського льоду в морі Росса, але невизначеними траєкторіями зміни в Східній Антарктиді.

Реакції біоти визначатимуться тим, наскільки легко таксони можуть витримувати зміни в межах існуючої фізіологічної гнучкості, адаптуватися до нових екологічних режимів або переходити на альтернативні місця, які придатні

для виживання. Очікується, що кінцеві наслідки таких змін, вийдуть за рамки змін у видових діапазонах і можуть призвести до нової функціональної організації та динаміки харчових ланцюгів ПО, та, потенційно, до зменшення біорізноманіття. Важливо відзначити, що важко передбачити зміну рівня харчових ланцюгів через взаємодію між різними енергетичними шляхами в харчових ланцюгах та наявністю зворотних зв'язків.

В кінцевому підсумку, зміни в середовищах існування ПО вплинуть на закономірності змін в первинній продукції та харчових ланцюгах. Пелагічні види можуть мігрувати на південь, так як океан нагрівається, а об'єм зимового морського льоду зменшується, але регіональна географія та океанографія можуть зробити цю реакцію більш складною.

Знання основних перемінних середовища існування, які обмежують діапазони ключових видів у межах харчових ланцюгів, будуть дуже важливими для визначення того, чи зможуть морські харчові ланцюги зменшуватись в напрямку полюсів.

1.2 Засоби збереження живих ресурсів Антарктики

АНТКОМ була створена на основі міжнародної Конвенції про збереження морських живих ресурсів Антарктики, набула чинності 7 квітня 1982 року. Це було зроблено у відповідь на зростаючу комерційну зацікавленість в ресурсах антарктичного криля, що є наріжним компонентом антарктичної екосистеми, і на надмірну експлуатацію в минулі роки декількох інших морських ресурсів Південного океану

Конвенція АНТКОМ застосовується до антарктичних морських живих ресурсів району до півдня від 60° південної широти і до антарктичних морських живих ресурсів району, що знаходиться між цією широтою та Антарктичною

конвергенцією (лінія, що з'єднує певні точки вздовж паралелей широти та меридіанів довготи), які є частиною морських екосистем Антарктики.

Метою Конвенції є збереження морських живих ресурсів Антарктики - популяцій плавникових риб, моллюсків, ракоподібних і всіх інших видів живих організмів, включаючи птахів, що мешкають на південь від Антарктичної конвергенції. Це означає запобігання скороченню чисельності будь якої виловлюваної популяції нижче рівня, який забезпечує її стійке поповнення і найбільший річний приріст.

Комісія АНТКОМ сприяє дослідженню і вивченню морських живих ресурсів Антарктики та її морської екосистеми. АНТКОМ збирає дані про стан популяцій морських живих ресурсів регіону, зміни в них і фактори, що впливають на чисельність і продуктивність виловлюваних видів, а також видів, пов'язаних з ними. Комісія забезпечує збір статистичних даних про вилови і промислове навантаження (обсяги всіх виробничих операцій, безпосередньо спрямованих на вилов риби) на виловлюванні популяції.

Комісія публікує всі діючі заходи по збереженню морських живих ресурсів Антарктики та веде їх облік.

Після вступу в силу Конвенції АНТКОМ був створений науковий комітет. Всі члени Комісії також є членами наукового комітету. Науковий комітет надає Комісії найкращу наявну наукову інформацію по рівням вилову та іншим питанням управління. Щорічні наради наукового комітету проводяться безпосередньо перед нарадою Комісії. Для розгляду широкого кола наукових питань комітет створив чотири робочих групи (по екосистемному моніторингу та управлінні; по оцінці рибних запасів; по статистиці, оцінках і моделюванні; по побічній смертності, пов'язаної з промислом) і підгрупу по акустичним зйомкам та методам аналізу [3], [4], [5].

1.3 Екосистемний підхід до управління

Оскільки АНТКОМ відповідає за збереження морських екосистем Антарктики, він застосовує екосистемний підхід до управління. Це не виключає можливість ведення промислу, за умови що такий промисел здійснюється стійким чином і враховує вплив лову на інші компоненти екосистеми.

Ключові організаційні компоненти АНТКОМ:

- Конвенція АНТКОМ, яка вступила в силу 7 квітня 1982 р.;
- директивний орган – «Комісія»;
- науковий комітет, який дає рекомендації Комісії, використовуючи найкращі наявні наукові знання;
- заходи щодо збереження та резолюції;
- членство АНТКОМ і положення, що стосуються міжнародного співробітництва та взаємодії;
- Секретаріат, що знаходиться в Хобарті (Тасманія), який сприяє роботі Комісії.

Прийняті АНТКОМ програми досліджень і моніторингу, а також вжиття заходів щодо збереження в Зоні дії Конвенції вносять цінний вклад у забезпечення глобальної продовольчої безпеки.

Конвенція АНТКОМ служить основою для збереження морських ресурсів ПО. За більш ніж 30 років АНТКОМ встановила глобальні стандарти для реалізації екосистемного підходу, що забезпечує стале використання морських живих ресурсів.

В основі цих досягнень лежать:

- визнана передова міжнародна програма проведення наукових спостережень в морі;
- рішення по управлінню, що враховують вплив на екосистему і стійкість промислових ресурсів;

- жорсткі процеси наукового аналізу, розроблені з метою сприяння розгляду морських охоронюваних районів в зоні дії Конвенції;
- поєднанні нагляду, забезпечення дотримання та ринкових механізмів контролю.

Конкретні досягнення включають:

- ведення боротьби з незаконним, незареєстрованим і нерегульованим (ННН) промислом;
- створення морських охоронюваних районів (МОР) в Південному океані;
- скорочення смертності морських птахів;
- створення Програми АНТКОМ з моніторингу екосистеми (СЕМР);
- управління уразливими морськими екосистемами (УМЕ) [3] ,[4], [5].

1.4 Ведення боротьби з незаконним, незареєстрованим і нерегульованим промислом

ННН промисел китача вперше був виявлений в зоні дії Конвенції на початку 1990 років, що викликало велике занепокоєння у Комісії. У відповідь на це Комісія прийняла і ввела ряд заходів по виявленню, стримуванню і ліквідації ННН промислу.

Все ще мало відомо про масштаб ННН промислу в зоні дії Конвенції. За наявною інформацією в даний момент в зоні дії Конвенції працює до семи ННН суден. Є свідчення того, що ці судна співпрацюють між собою і їх підтримує рефрижераторне судно. Тривалі проблеми, пов'язані з ННН промислом, включають відсутність достовірної інформації про промислові операції, брак детальної інформації про вилови, отримані ННН суднами, а також про вплив ННН діяльності на види прилову, в т.ч. на вразливі морські екосистеми. Країни-члени АНТКОМ продовжують активну роботу по ліквідації ННН промислу в зоні дії Конвенції [3] ,[4], [5].

1.5 Створення морських охоронюваних районів в Південному океані

МОР являють собою морський район, що забезпечує охорону всіх або частини природних ресурсів, які знаходяться в ньому. Його метою є надання охорони морським видам, біорізноманіттю, місцям проживання, ділянкам харчування і нагулу і, в деяких випадках, збереження історичних та культурних об'єктів. МОР можуть сприяти збереженню екосистемних процесів і підтримці біологічної продуктивності. АНТКОМ використовує МОР на додаток до інших механізмів управління, таким як обмеження на вилов, обмеження на використання снастей та закриття районів.

У 2009 р. АНТКОМ заснував перший в світі МОР у відкритому морі - Морський охоронюваний район на південному шельфі Південних Оркнейських островів - на акваторії в південній частині Атлантичного океану площею 94 000 км². Це був перший крок на шляху до створення репрезентативної системи МОР в зоні дії Конвенції; передбачається створення нових МОР в рамках Загальної системи для створення морських охоронюваних районів АНТКОМ («Міра по збереженню 91-04»).

На 35 щорічній нараді Комісії в 2016 році країни-члени вирішили створити новий МОР в морі Росса. Цей район моря Росса площею 1,55 млн. км² стане найбільшим в світі МОР, коли він набере чинності 1 грудня 2017 року, згідно з «Мірою по збереженню 91-05».

Регіон моря Росса містить об'єкти, що мають виняткову екологічну цінність і наукове значення, а шельф моря Росса є одним з найбільш продуктивних районів ПО і одним з небагатьох місць в світі, в якому до цих пір збереглися угруповання вищих хижаків в повному об'ємі. Крім того, регіон моря Росса відноситься до найбільш добре вивчених районів континентального шельфу в високих широтах південної півкулі; по ньому є унікальні тимчасові ряди даних, що описують геологічну, океанографічну, кліматичну та екологічну історію, що дає величезні можливості для вивчення наслідків зміни клімату в цьому регіоні.

Цей МОР включатиме зону «що не обловлюється» (72% загальної площі), в якій заборонені всі види промислу. В інших частинах МОР буде дозволятися обмежений промисел риби і криля в науково-дослідних цілях, окрім іншого, спрямований на моніторинг змін в екосистемі, які можна віднести на рахунок промислу, зміни клімату, або того й іншого [3], [4], [5].

1.6 Скорочення смертності морських птахів

За останні 15 років на регульованих АНТКОМ промислах смертність морських птахів в результаті промислових операцій скоротилася з декількох тисяч птахів щороку майже до нуля. Це було досягнуто за рахунок застосування ряду заходів, включаючи сезонні закриття, нічні установки, використання стримерних ліній, застосування додаткових грузил для підвищення швидкості занурення, заборона на скидання відходів під час установки і забору, а також використання пристроїв для відлякування птахів навколо місця забору.

Незважаючи на виняткове скорочення смертності морських птахів в зоні дії Конвенції АНТКОМ, популяції морських птахів в ПО як і раніше піддаються ризику, оскільки при веденні промислу в водах на північ від зони дії Конвенції не обов'язково виконувати той же самий набір заходів, які дозволили б досягти подібних рівнів охорони нецільових видів.

Скорочення прилову морських птахів – ефективне застосування наукових і політичних заходів [3], [4], [5].

1.7 Створення Програми з моніторингу екосистеми Комісією зі збереження морських живих ресурсів Антарктики

Застосовуваний АНТКОМ «екосистемний підхід» до управління комерційним промислом морських живих ресурсів Антарктики виходить за рамки моніторингу впливу промислу на види, що виловлюються (об'єкти лову), охоплюючи моніторинг залежних видів і пов'язаних видів з метою виявлення можливих наслідків.

Залежні види — це ті види, які або харчуються цільовими видами, або на них впливає вилучення цільових видів з трофічної мережі. До пов'язаних видів зазвичай відносяться ті види, які піддаються безпосередньому впливу промислу, наприклад, за допомогою прилову або побічної смертності.

Для отримання цієї інформації АНТКОМ в 1989 р. створив СЕМР. СЕМР переслідує дві цілі:

- виявляти і реєструвати значні зміни в основних компонентах морської екосистеми в межах зони дії Конвенції, що лежить в основі збереження морських живих ресурсів Антарктики;
- встановлювати відмінність між змінами, викликаними промислом комерційних видів, і змінами, викликаними мінливістю навколишнього середовища, як фізичною, так і біологічною [3], [4], [5].

1.8 Управління уразливими морськими екосистемами

Результатом виявлення негативного впливу і загроз для УМЕ (включаючи підводні височини, гідротерми, холодноводі корали і поля губок) став заклик до глобальних дій, спрямованих на регулювання донного промислу в районах відкритого моря. Відгукнувшись на цей заклик, АНТКОМ розробив методи

визначення УМЕ та інструкції на випадок виявлення їх промисловими судами. АНТКОМ прийняв ряд заходів по збереженню, спрямованих на захист УМЕ:

- обмеження на використання донних тралів в районах відкритого моря зони дії Конвенції;
- донний промисел в зоні дії Конвенції;
- тимчасовий захід щодо донного промислу відповідно до «Міри по збереженню 22-06» при виявленні вразливих морських екосистем в зоні дії Конвенції;
- охорона зареєстрованих вразливих морських екосистем в підрайонах, ділянках, дрібномасштабних дослідних одиницях або районах управління, відкритих для донного промислу.

Моніторинг дотримання цих заходів по збереженню ведеться за допомогою Програми наукових спостережень при оцінці, що активно проводиться Постійним комітетом щодо виконання та дотримання (SCIC) – «Standing Committee on Implementation and Compliance».

1.9 Програма з моніторингу екосистеми Комісії зі збереження морських живих ресурсів Антарктики - стандартні методи

Для того, щоб управляти комерційним промислом морських живих ресурсів Антарктики відповідно до екосистемного підходу, про який йдеться в статті II Конвенції АНТКОМ, необхідно враховувати вплив промислу на промислові види (цільові види), а також на залежні і пов'язані види.

Основна функція СЕМР полягає в моніторингу ключових параметрів життєвого циклу окремих залежних видів з метою виявлення змін в чисельності промислових видів. «Залежні види» – це морські хижаки, для яких види, які є об'єктами комерційних промислів, служать основним компонентом раціону. Якщо

говорити про «залежних від криля видів», які використовуються в СЕМР, то до них відносяться наземні види, такі як тюлені і пінгвіни.

Придатні «види-індикатори» повинні демонструвати вимірювану реакцію (наприклад, зміни в розмірі популяції, репродуктивному успіху, масі тіла і поведінці при добуванні корму) на зміни в наявності промислових видів. Просторові і тимчасові масштаби, в яких різні параметри СЕМР відображають зміни в стані екосистеми, можуть охоплювати від кількох днів у відносно невеликому радіусі від ділянки розмноження (напр., тривалість ходу за їжею і темпи зростання дитинчат) до місяців (напр., репродуктивний успіх), тоді як показники розміру популяції відображають комбінацію багаторічних факторів, включаючи стан/живучість дорослих особин і поповнення молоддю.

У програмі СЕМР використовуються наступні види-індикатори:

- пінгвін Аделі (*Pygoscelis adeliae*);
- антарктичний пінгвін (*P. antarctica*);
- папуаський пінгвін (*P. papua*);
- золотоволосий пінгвін (*Eudyptes chrysolophus*);
- чорнобривий альбатрос (*Thalassarche melanophrys*);
- антарктичний буревісник (*Thalassoica antarctica*);
- капський голубок (*Daption capense*);
- південний морський котик (*Arctocephalus gazella*).

Деякі залежні від крилю види, такі як тюлень-крабоїд (*Lobodon carcinophagus*), які, ймовірно, можуть реагувати на зміни в наявності криля, не використовуються при моніторингу, оскільки вони живуть в паковому льоді і це не дозволяє проводити їх повторний/щорічний моніторинг.

З метою забезпечення співставлення різних ділянок і періодів часу АНТКОМ прийняв набір методів «Програма АНТКОМ з моніторингу екосистеми - стандартні методи», які включають інформацію про те, як повинні збиратися дані, формати подання цих даних в Секретаріат АНТКОМ і процедури аналізу даних [3], [4], [5].

1.10 Представлення даних моніторингу

Будь-які дані моніторингу, зібрані відповідно до Стандартного методу СЕМР, можуть надаватися в Секретаріат для включення в базу даних СЕМР з використанням відповідної форми СЕМР.

У разі даних по ділянці, де дані СЕМР раніше не збиралися, необхідно представити інформацію про місцезнаходження ділянки і карту з детальним зазначенням фактичного місцезнаходження колоній/районів, за якими дані були зібрані, з тим щоб Секретаріат міг присвоїти ділянці унікальний код. Ділянка, по якій були зібрані дані СЕМР, вважається «ділянкою СЕМР» після присвоєння їй прийнятого унікального коду ділянки.

Якщо дані про параметри СЕМР, таких як розмір популяції або репродуктивний успіх, були зібрані за допомогою інших методів, ніж ті, які описуються в Стандартних методах СЕМР, їх все-таки можна буде представити в рамках СЕМР. Для цього буде потрібний докладний опис фактично застосованих методів, з тим щоб АНТКОМ міг оцінити, наскільки ці методи і результати можна порівняти з існуючими методами.

Оцінка нових методів, що використовуються в рамках СЕМР, є важливою частиною роботи АНТКОМ, особливо тому, що стандартні методи були розроблені в 1980 роках і потрібно, щоб СЕМР могла користуватися новими методами і технологіями (напр., стаціонарними камерами дистанційного спостереження та супутниковими зображеннями для підрахунку пінгвінів). Передбачається, що всі нові методи збору даних для СЕМР будуть представлятися на розгляд до Робочої групи з моніторингу та управління екосистемами (WG-EMM) «Working Group on Ecosystem Monitoring and Management» [3], [4], [5].

1.11 Охорона ділянок Програми з моніторингу екосистеми Комісії зі збереження морських живих ресурсів Антарктики

У відповідь на побоювання відносно того, що діяльність на деяких ділянках СЕМР може заважати збору важливих даних моніторингу, АНТКОМ в 1990 р. прийняв міру по збереженню для забезпечення охорони ділянок СЕМР. Першочергово це була «Міра по збереженню 18-09», яка потім стала «Мірою по збереженню 91-01».

Першою ділянкою, якій була надана охорона («Міра по збереженню 91-03»), став в 1991 р. острів Сіл, однак збір даних СЕМР на цій ділянці припинився в 1994 році (через зсув на ділянці моніторингу), і в 2007 р. статус охорони і дана «Міра по збереженню» втратили силу.

Другою охоронюваною ділянкою став мис Ширрефф («Міра по збереженню 91-02», прийнята в 1994 р.), а в 2000 р. Комісія вирішила, що, оскільки цій ділянці також надана охорона в рамках Особливо охоронюваних районів Антарктики (ООРА), немає необхідності в подвійному регулювання з боку АНТКОМ і Консультативної Ради з Договору про Антарктику (КНДА), тому «Міра по збереженню 91-02» втратила силу.

В даний час немає ділянок, яким була б надана охорона відповідно з «Мірою по збереженню 91-01», проте 7 із 13 діючих ділянок моніторингу СЕМР на південь від 60° пд.ш. знаходяться в межах ООРА або Особливо керованих районів Антарктики (ОКРА), і тому їм надається додаткова охорона за допомогою цього механізму [3], [4], [5].

2 ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ДОВКІЛЛЯ ПІВДЕННОГО ОКЕАНУ

Ніколи не було настільки важливим вивчення Антарктики й ПО та їх ролі у глобальній системі Землі, як регіону, який зазнає різких змін, що мають глобальні наслідки. Кліматичні, фізичні та біологічні властивості Антарктики та ПО тісно пов'язані з іншими частинами глобального навколишнього середовища океанами та атмосферою. У 2009 році Науковий комітет з антарктичних досліджень (SCAR) – «Scientific Committee on Antarctic Research» опублікував знаковий «Звіт з питань зміни клімату та охорони навколишнього середовища Антарктики» (ACCE) – «Antarctic Climate Change and the Environment *Report*».

Група експертів ACCE забезпечує реалізацію діяльності SCAR, і видає щорічне оновлення для Звіту ACCE, яке представляють на КНДА.

2.1 Прогнозування кліматичних змін в Антарктиці за допомогою математичних моделей

Кліматичні моделі є основним інструментом для проведення кількісної оцінки можливих змін клімату в Антарктиці протягом XXI століття. Існує висока ступінь згоди щодо деяких аспектів прогнозів, представлених моделями, проте потрібно краще розуміння ключових компонентів кліматичної системи Антарктики, таких як процеси, що відбуваються з морським льодом, прибережними океанськими водами і шельфовими льодовиками. Найближчим часом (в масштабах декількох років) ознаки зміни клімату будуть невеликі в порівнянні з природними циклами (пов'язаними з таким феноменом як Ель-Ніньо, або Південна осциляція), віддалений вплив яких на атмосферу Антарктики важко спрогнозувати. У довгостроковій перспективі (в масштабах декількох десятиліть)

надійність прогнозування за допомогою кліматичних моделей обмежена невизначеністю щодо шляхів техногенних викидів, реалізму кліматичних моделей і відповідної реакції між іншими елементами системи Землі (наприклад, льодовими щитами) [6].

У поняття клімат Антарктики входить стан атмосфери, океану, снігу і льоду по всьому антарктичному континенті і оточуючому його ПО. У заданому місцезнаходженні клімат, який теплішає, буде характеризуватися довгостроковим фоновим зміщенням (тобто сигналом) в поєднанні з короткостроковими коливаннями з року в рік (тобто шумом). Загальноприйнятою методикою Всесвітньої метеорологічної організації є визначення клімату на підставі усереднених даних параметрів (наприклад, температури) за 30 річний період. У більш коротких тимчасових масштабах існують великі коливання пов'язані зі щоденною погодою і великими багаторічними циклами, такими як Ель-Ніньо і Ла-Нінья. Тому зміни клімату слід розглядати в перспективі декількох десятиліть. Саме такий підхід і використовується. Однак при цьому також важливо відзначити й існування компонентів природних коливань, які проявляються протягом багатьох десятиліть і в деяких випадках можуть вплинути на ефективність навіть 30 річних засобів для відстеження базового сигналу зміни клімату [7].

Основна увага приділяється використанню кліматичних моделей для прогнозування майбутніх змін клімату. Однак вважається, що альтернативні підходи, такі як використання минулих аналогів [8], можуть дати альтернативні погляди на майбутній клімат Антарктики. Всі основні сучасні кліматичні моделі, створені в приблизно 30 різних центрах моделювання по всьому світу, засновані на традиційних фізичних законах геофізичної гідродинаміки, таких як закони динаміки Ньютона. Однак обмеження по комп'ютерній потужності означають, що обчислення моделі все ж в цілому виконуються в значному масштабі для глобального моделювання, при якому атмосфера представлена у вигляді послідовності квадратів, величина яких в даний час складає 100 км. Таким чином, це представляє основну складність в реалістичному моделюванні явищ

(наприклад, хмар) і фізичних характеристик (наприклад, складній гірській місцевості) меншого масштабу.

Ґрунтуючись на припущенні про те, що концентрація парникових газів продовжить зростати до 2100 року, можна з великою впевненістю говорити про ряд прогнозованих змін. При допущенні антропогенного чинника середньої інтенсивності (тобто приблизно подвоєння концентрацій CO₂ на той час) існує високий рівень узгодженості між різними кліматичними моделями для наступних фактів:

- відбудеться підвищення середньорічної температури поверхні землі по всій Антарктиці (дві третини кліматичних моделей в діапазоні від 1,8 °C до 3,3 °C) [9];

- відбудеться збільшення середньорічної швидкості накопичення снігу на землі по всій Антарктиці (на 8 % та 18 %) [9];

- відбудеться відступ загального середньорічного морського крижаного покриву в Південній півкулі (на 24 % та 42 %) [9];

- відбудеться зменшення утворення прибережного морського льоду при одночасному збільшенні танення материкового льоду, що в сукупності призведе до ослаблення основної циркуляції вод Світового океану - термохалінної циркуляції [10];

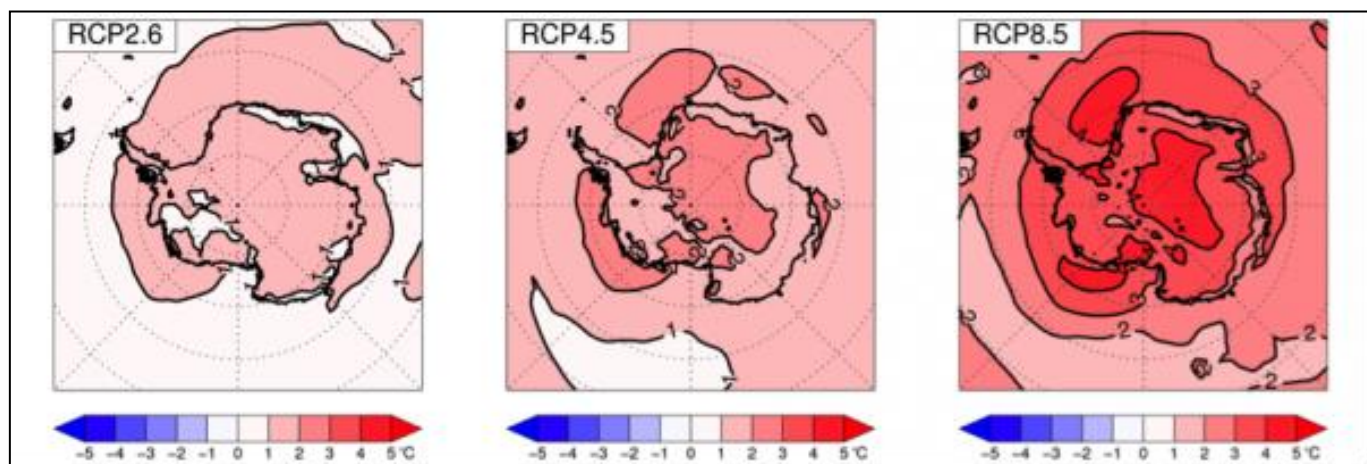
- водні маси ПО, такі як антарктичні проміжні води (АПВ), стануть теплішими і опрісненими, у міру того як щільності формування водних мас стануть значно нижче [11], [12]. АПВ важливі для зміни клімату, тому що саме в цих водних масах міститься найвища концентрація антропогенного CO₂ [13];

- підвищення кількості снігу, що випав, буде супроводжуватися збільшенням швидкості витрати льоду [14], [15]. Таким чином, на негативний вплив підвищеної кількості снігу, що випав, на рівень моря може здійснювати протидію підвищення швидкості потоку льоду і збільшення стоку материкового льоду в океан.

З урахуванням складнощів, властивих прогнозуванню поведінки людини, загальний підхід, прийнятий в науковому співтоваристві з вивчення клімату,

полягає в розгляді ряду правдоподібних сценаріїв «а що, якщо» для антропогенного викиду парникових газів без однозначного судження про те, який з них може бути більш імовірним [16]. Тому приблизні оцінки зміни клімату, засновані на цих сценаріях, називаються проєціюванням, а не прогнозами [наприклад, див. рис. 7].

Зміни до середини XXI століття не обов'язково будуть підкорятися закономірності довгострокового потепління [17]. Основний наслідок для високопосадовців полягає в тому, що в регіонах, в яких за останні десятиліття спостерігалось дуже швидке потепління, потенційно може наступити період похолодання в масштабах декількох років, перш ніж фонове потепління візьме верх. В даний час проводяться великі наукові дослідження, спрямовані на сезонне і десятирічне прогнозування з метою заповнення прогалини в знаннях в масштабах довгострокової зміни клімату [18].



Примітка. Приземний шар повітря представлений 2 м на поверхню землі. Прогнозовані зміни беруться на період 2069-2098 рр. (кінець XXI ст.). На рис. 7 представлені наступні сценарії кліматичних чинників: RCP2.6 – низькі; RCP4.5 – середні; RCP8.5 – високі.

Рисунок 7 – Кліматичні моделі зміни температури приземного шару повітря до кінця XXI століття [16], [19]

Серед відомих важливих сценаріїв кліматичних визначальних чинників, які згадувались у рис. 7, виділяють такі як підвищення викидів парникових газів і відновлення озону в стратосфері [16]. Всі зміни співвідносяться з періодом 1970-

1999 рр. в «історичній» кліматичній моделі зі спостережуваними рівнями парникових газів та іншими відомими природними та антропогенними факторами. Інформація з 41 кліматичної моделі була об'єднана на підставі методики, описаної в науковій статті *Дж. Гутта* (та ін. авторів [19]). У кліматичній моделі використовувався набір даних «Подвоєної моделі взаємопорівнюваної фази проекту - 5» (CMIP5) – «Coupled Model Intercomparison Project Phase 5», з якого була взята інформація для самого останнього звіту Міжурядової групи експертів зі зміни клімату. До числа 41 кліматичної моделі увійшли: ACCESS1.0, ACCESS1.3, BCC-CSM1.1, BCC-CSM1.1(m), BNU-ESM, CanESM2, CCSM4, CESM1(BGC), CESM1(CAM5), CESM1(WACCM), CMCC-CESM, CMCC-CM, CMCC-CMS, CNRM-CM5, CSIRO-MK3.6.0, EC-EARTH, FGOALS-g2, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-H-CC, GISS-E2-R, GISS-E2-R-CC, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, MRI-ESM1, NorESM-M, NorESM-ME.

Серед основних труднощів в описі кліматичної системи Антарктики в кліматичних моделях, які спостерігались, можна виділити:

– ПО. Так само як штормові циклони в атмосфері, в океані виникають невеликі циклони і антициклони (або вихори). Основна проблема при моделюванні океану полягає в тому, що розміри цих вихорів набагато менші, ніж у їх атмосферних аналогів, тому для правильного їх математичного уявлення необхідні невеликі квадрати [20]. В даний час в цілому відсутні достатні обчислювальні потужності, щоб зробити це реалістично, а вплив цих океанічних циклонів повинен апроксимуватися;

– представлення атмосфери і льоду над складною земною поверхнею. Антарктичний півострів являє собою регіон особливої важливості з огляду на чутливості материкового льоду до танення поверхні [21] і подальшого впливу як на рівень світового океану, так і на регіональні екосистеми. Однак в більшості кліматичних моделей не можна точно представити складну земну поверхню

високих гір. Для вирішення цього питання проводяться додаткові дослідження кліматичних моделей, обчислювальні витрати яких сконцентровані на конкретному місці, такому як Антарктичний півострів, і, таким чином, дозволяють використовувати менші квадрати сітки і поліпшене уявлення складної земної поверхні [22];

– морський лід. Морський лід - один з найскладніших для побудови компонентів в кліматичних моделях [23]. Так як морський лід безпосередньо контактує як з атмосферою, так і з океаном, майже всі з вищезазначених питань, що стосуються моделювання клімату Антарктики, впливають на відтворення реалістичних моделей морського льоду по площі і по товщині. Точність відтворення площі морського льоду, яка спостерігається, можливо є головним питанням при оцінці надійності майбутніх кліматичних проєкцій із заданої кліматичної моделі;

– хмари в Антарктиці. Про утворення хмар у відносно збереженій в первозданному вигляді атмосфері Антарктики відомо небагато [24]. Хмари є одним з головних регуляторів температури земної поверхні і тому служать істотним фактором в описаних вище труднощах представлення морського льоду і Південного Океану в кліматичних моделях. Польові дослідження, що проводяться для вимірювання властивостей хмар над Південним Океаном і Антарктикою, є однією з основних складових наукових досліджень, які проводяться з концентрацією особливої уваги на вирішення проблем систематичних похибок в кліматичних моделях при представленні температур морської поверхні ПО;

– взаємодія льоду з океаном на фронтах льодовиків і в пустотах шельфового льоду. З'являється все більше і більше доказів того, що фронти льодовиків, основи плаваючого язика льоду і порожнечі під шельфовим льодом є основними середовищами, що впливають на динаміку втрати маси льодовиків і льодового покриву (а отже і на зростання рівня моря). Ці середовища дуже слабо досліджені і в даний час мають обмежене або спрощене уявлення в моделях льодового покриву [10].

Консультативна група SCAR з АССЕ щорічно збирає оновлені дані за результатами наукових досліджень клімату Антарктики і представляє їх на КНДА. Ці оновлені дані додаються в основний Звіт АССЕ від 2009 року [25].

2.2 Вразливість екосистем Південного океану до зміни клімату

Велика частина живих організмів ПО особливим чином пристосувалася до унікальних умов Антарктики. Для даного великого регіону характерні низькі температури, наявність вкритої кригою берегової лінії і чітко виражені сезонні коливання в морському льодовому покриві, світловому режимі і біологічній продуктивності. Необхідно дослідити чутливість біоти ПО до змін, які останнім часом відбуваються і звернути увагу суспільства і зацікавлених сторін на основні області, які викликають занепокоєння, а також на актуальні напрямки майбутніх досліджень. Вважається, що більшість видів, які населяють ПО, чутливі до зміни клімату. Зростання мікро-водоростей, які служать основою харчового ланцюга, дуже сильно залежить від крижаного покриву на морі. Прогнозоване зменшення крижаного покриву матиме ефект ланцюгової реакції для вищих трофічних рівнів. Організми, які живуть в льоді, криль, риба, пінгвіни, тюлені і кити будуть змушені шукати нові місця проживання або кормові території. Однак граничні кліматичні умови, які можуть привести до загибелі спільнот або популяцій залишаються в більшій мірі невідомими. Деякі організми можуть навіть виграти від зміни клімату завдяки збільшенню відтворення і швидкості росту.

На загальну думку, ПО робить свій внесок у важливі глобальні послуги екосистем. До них відносяться виділення кисню, поглинання вуглекислого газу, круговорот поживних речовин, забезпечення кормових територій для таких широко поширених тварин, як кити і морські птахи, а також виробництво біологічних продуктів для споживання людьми. Тому вразливість морських організмів перед лицем наслідків кліматичних змін є дуже серйозною проблемою

і визначається як сприйнятливість таких організмів до відповідної зміни клімату і відсутність можливостей справлятися з цим явищем і адаптуватися до нього [7], [8]. Отже, чутливість біологічних процесів і екологічно важливих видів до зміни клімату являє собою важливий предмет дослідження [9]. Розуміння цих проблем вкрай необхідно для розробки ефективних стратегій збереження екосистем і управління ними.

Морські водорості беруть участь у виробництві кисню і зв'язуванні вуглецю, який міститься в атмосфері за допомогою процесу фотосинтезу, одночасно утворюючи органічні речовини, що забезпечують харчування організмів більш вищих рівнів харчового ланцюга. Поряд з прогнозованим збільшенням поширення фітопланктону у відкритих водах в зонах зменшення крижаного покриву (і це вже спостерігалось в окремих місцях) [10], [11], відзначається також його зменшення, коли внаслідок споживання і підвищеної стратифікації води скорочується кількість поживних речовин. Зрушення у видовому складі від більш великих до менш великих діатомей і фіто-джгутикових обумовлені змінами в динаміці океану і морського льоду, а також змінами ступеня мінералізації льодовиків внаслідок їх танення (див. рис. 8) [11], [12]. Оскільки фітопланктон знаходиться в основі морського харчового ланцюга, такі, обумовлені кліматом, зміни можуть впливати на всю морську екосистему. Складність і велике біологічне різноманіття інших груп антарктичних мікроорганізмів (бактерій, архей і одноклітинних тварин) створюють додаткові проблеми при оцінці вразливості екосистеми в разі кліматичних змін. Ці організми нерозривно пов'язані з фітопланктоном і мають велике значення для функціонування екосистеми і її взаємозв'язків (наприклад, біогеохімічних зв'язків, симбіозу, винищення хижаками [13]).

Схема впливу масштабних кліматичних і локальних фізичних характеристик на біологічні процеси, що відбуваються на узбережжі західної частини Антарктичного півострова (ЗАП), представлена на рис. 8 [12].

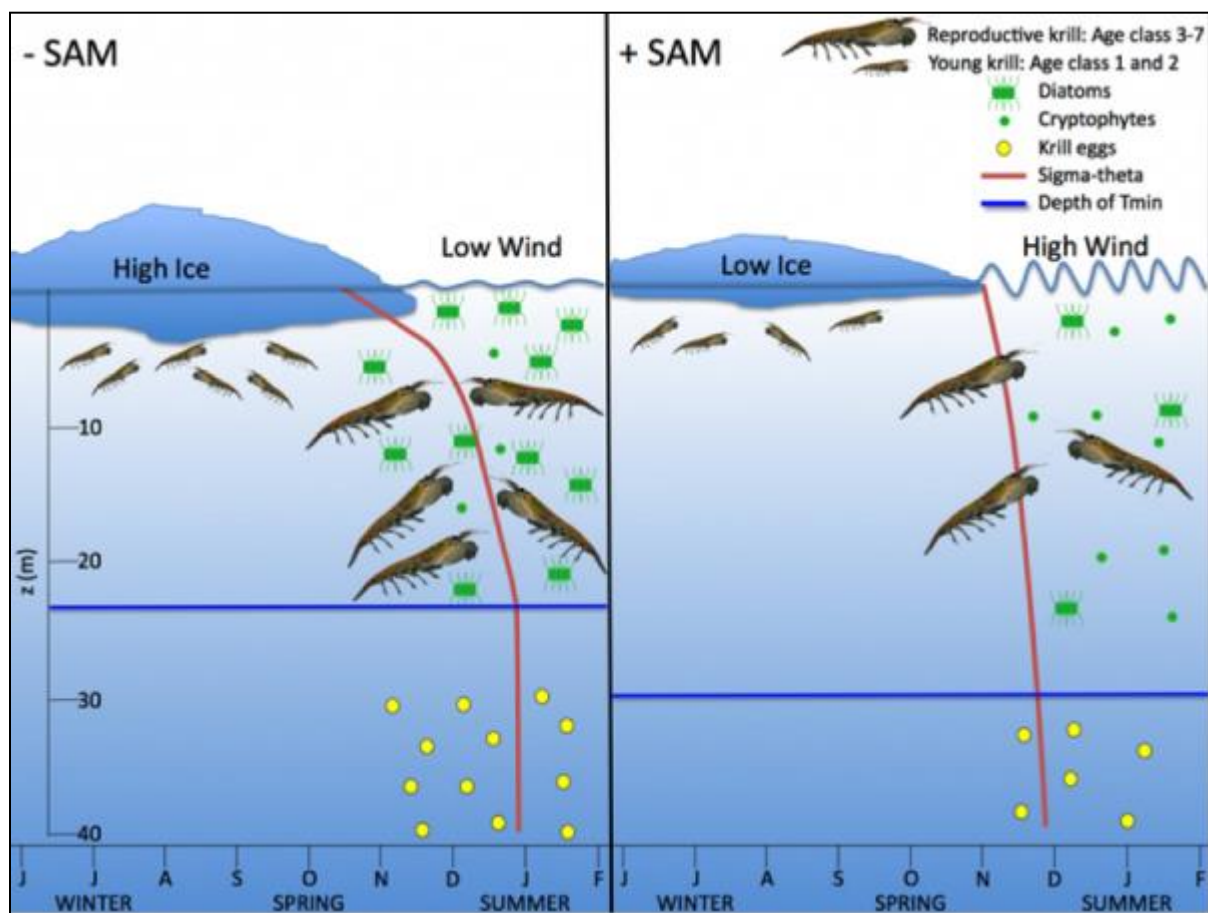


Рисунок 8

Узагальнена ілюстрація того, як кліматичні, погодні та фізичні океанографічні процеси зимового та весняного періодів, частково обумовлені фазами Південного кільцевого режиму (ПКР) – Антарктичної осциляції, каскадно переходять від фітопланктону до відтворення криля. Різноманітність ПКР характеризується протилежними аномаліями атмосферного тиску між Антарктикою і середніми широтами та відбивається в силі субполярних західних вітрів, так що холодні південні вітри дмуть через ПКР під час негативної фази ПКР (ліва область), а тепліші північно-західні вітри дмуть над ЗАП під час позитивної фази ПКР (права область). Зазвичай діатомеї є найчисленнішим типом фітопланктону і улюбленою їжею для криля в прибережних водах ЗАП. Джгутикові криптофіти можуть часом домінувати в ЗАП і, внаслідок їх малого розміру, недостатньо ефективно пов'їдатися крилем. Температурний мінімум

(T_{\min}) - верхня межа холодного залишкового зимового водного шару в регіоні. Сигма-тета - градієнт щільності морської води між T_{\min} і поверхнею – чим більше вигнута лінія, тим більше градієнт щільності. Фітопланктон, криль, ікра криля і сигма-тета узагальнені для якісного відображення процесів («більше» проти «менше») і не представляють кількісну різницю між протилежними подіями ПКР. Примітним є те, що самки антарктичного криля нерестяться в глибоких водах [12].

Щільність скупчення мікроводоростей в нижніх шарах морського льоду зазвичай в 1000 разів вище, ніж у морській воді. Коли тане лід і мікроводорості опускаються на морське дно, вони стають багатим джерелом їжі для зоопланктону, а також спільнот, що мешкають на дні моря (бентосу). У разі реалізації сценарію скорочення морського льоду поширення багатьох видів скоротиться. Численним веслоногим, таким як *Drescheriella glacialis*, морський лід необхідний як місце для розмноження або зростання [14]. Антарктичний криль (*Euphausia superba*) і антарктична сребрянкя (*Pleuragramma antarctica*) також залежать від морського льоду протягом частини свого життєвого циклу. Вони є переважаючими видами і являють собою багаті енергією трофічні зв'язки між планктоном і вищими хижаками. Очевидно, що порушення їх відтворення є наслідком потепління і відступу морського льоду [15], [16]. Їх повне зникнення і часткова заміна енергетично бідними желеподібними сальпами в окремих місцях Антарктичного півострова підтверджує їх вразливість і перші реакції на зміну клімату. Зменшення чисельності цих основних видів та іншої біоти морського льоду по ланцюгу відіб'ється на вищих трофічних рівнях і довгостроковому здоров'ї екосистеми.

Зоопланктон є найважливішою ланкою в харчовому ланцюзі, так як він харчується фітопланктоном і мікробами та служить їжею для вищих організмів. Підвищення температури, ймовірно, призведе до зменшення чисельності видів, що пристосувалися до вкрай холодного клімату (наприклад, криля *Euphausia cystallorophias*), поступившись місцем видам, стійким до теплої води, наприклад дрібним веслоногим *Oithona similis*. Прогнозується, що види які мешкають в

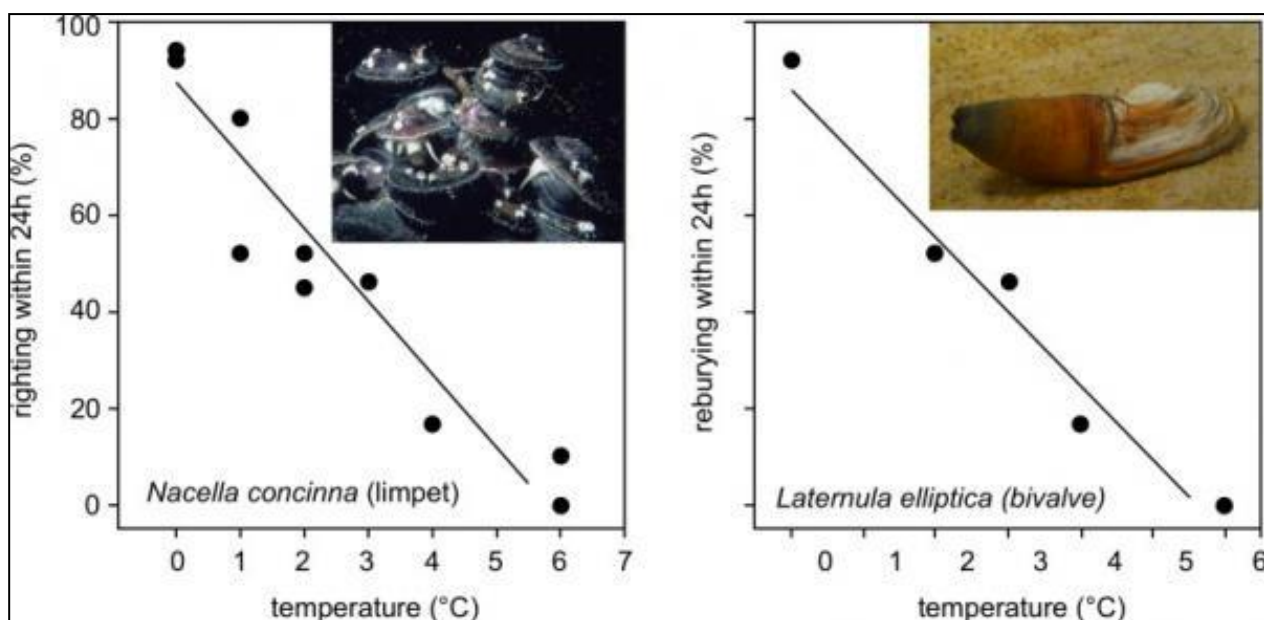
теплій воді будуть також мігрувати на південь і можуть витіснити поблизу континенту холодостійкі види, які не зможуть піти ще далі на південь. З іншого боку, в найближчому майбутньому в деяких районах зросте чисельність форамініфер внаслідок складних екологічних причин [17]. Закислення океану являє собою додаткову небезпеку для антарктичних екосистем. Воно може вплинути на розвиток і фізіологію не тільки тих видів, які мають карбонатно-кальцієві раковини, наприклад, на птероподів (крилоногих молюсків), а й на криль, привівши до довгострокового скорочення популяції. Це відіб'ється на всій морській екосистемі і може привести до зміни обсягів поглиненого океаном з атмосфери двоокису вуглецю.

Бентос грає важливу роль в круговороті вуглецю і поживних речовин, а також в різноманітності морських організмів в цілому. У лабораторних дослідженнях антарктичні бентичні безхребетні, особливо більші види, показали меншу стійкість до потепління, ніж види помірною клімату, хоча, згідно зі спостереженнями, вони перенесли прогнозовані підвищення температури, які вже відзначаються на захід від Антарктичного півострова (див. рис. 9) [9], [18], [20]. Хоча деякі види мають високу теплову стійкість, вичерпних знань про порогові значення чутливості організмів до кліматичних змін в цілому не вистачає.

На рис. 9 відображено процентну частку особин молюска *Nacella concinna*, здатних випрямлятися протягом 24 годин після їх перекидання, з однієї сторони, а з іншої – процентну частку особин молюска *Laternula elliptica*, які успішно заглибилися в ґрунт протягом 24 годин після їх вилучення з осадового шару. Лінія на рисунку показує найменшу квадратичну регресію, підібрану після арксинус-перетворення даних [18].

Морські вищі хижачки також служать індикаторами стану екосистем і зараз їх майбутнє бачиться невизначеним. Хоча зникнення льоду на півострові привело до серйозного скорочення популяцій, які мешкають на ньому, загальна чисельність пінгвінів Аделі залишається стабільною і навіть росте в деяких окремих місцях. Проте, є ознаки того, що ситуація може швидко змінитися: недавно зареєстровані крайні показники поширення морського льоду поряд з

незвичайними дощовими періодами в Східній Антарктиці привели до збільшення протяжності кормових подорожей і, в кінцевому підсумку, до повного порушення розмноження у ймовірно стійкій зоні [21]. На основі методів моделювання прогнозується зменшення популяцій легендарного імператорського пінгвіна в масштабах континенту і практично його вимирання в окремих районах до кінця цього століття [22]. Більш того, змінені картина пірнання південних морських слонів свідчить про те, що їм доводиться докладати більше зусиль для добування їжі в ПО, який теплішає [23].



Примітка. Зліва зображений молюск *Nacella concinna*; справа – двостулковий молюск *Laternula elliptica*.

Рисунок 9 – Вплив температури на поведінку двох бентичних антарктичних морських безхребетних [18]

Зміна клімату може торкнутися не тільки окремих видів, а й цілі співтовариства [24]. Це відбувається в міру збільшення масштабів руйнування дна шельфу підводними частинами айсбергів, відступу льодовиків і змінами в морському крижаному покриві [25], [19]. Морська екосистема в цілому також змінюється в результаті руйнування шельфового льоду, коли вкрай енергетично-бідна система переміщається в більш «нормальні» антарктичні умови з

інтенсивним зростанням мікрководоростей, які служать їжею для тварин-споживачів в короткий літній період [26]. В результаті такі бентичні організми, як губки, асцидії і офіури можуть демонструвати несподівано швидке зростання популяції і високу смертність [26], [27]. Як правило, уразливості таких систем можуть викликати спадні ланцюгові реакції в харчовому ланцюгу, спрямовані на конкуруючі або висхідні сили в залежності від того, на які типи організмів і як виявляється вплив [24]. Ще невідома здатність до самовідновлення (стійкість) багатьох видів або спільнот, хоча еволюційні процеси можуть призвести до тимчасової генетичної адаптації, особливо в мікроорганізмах.

Нам необхідні додаткові міждисциплінарні та узгоджені на міжнародному рівні дослідження для моніторингу основних видів, їх адаптованості і умов навколишнього середовища, що визначають їх характеристики. Необхідні довгострокові польові експерименти, дослідження зв'язків екосистем і моделювання майбутнього розвитку подій, в тому числі впливів численних стрес-факторів і нелінійних біологічних взаємодій [19], [28]. Нарешті, така інформація повинна забезпечити основу для комплексної оцінки вразливості біоти ПО, впровадження раціональних охоронних заходів і ефективних заходів управління.

3 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДІАГНОЗУ ТА ПРОГНОЗУ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ ПІВДЕННОГО ОКЕАНУ

Для вирішення задач охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів ПО використовуються математичні моделі різної складності. Всі існуючі моделі можуть бути класифіковані відповідно до *Hollowed* та ін. [29]. Ця класифікація була переглянута та оновлена у роботі *Eva E. Plaganyi* – «Моделі екосистемного підходу для рибальства». [30].

Моделі, у яких представлена лише одна з складових всієї екосистеми, називаються «мінімально реалістичними моделями» (МРМ) і зазвичай фокусуються на внутрішньо-видових взаємодіях одного або кількох видів організмів. Вони можуть також включатися до розгляду питань, що пов'язані з деякими фізичними та екологічними чинниками. На відміну від МРМ моделей, «моделі динамічних систем» (МДС) включають показники навколишнього середовища та об'єкти нижніх трофічних рівнів, і, як правило, не деталізують об'єкти вищих трофічних рівнів (наприклад, коли розглядаються питання управління в рибальстві). При класифікації моделей також важливо розрізняти моделі за використанням вікової структури організмів, а також основних просторових аспектів.

«Моделі всієї екосистеми» (МЕ) – це моделі, в яких беруться до уваги всі трофічні рівні в екосистемі. Найбільш відомі і широко застосовані з них – це ECOPATH [31], ECOSIM [32], ECOSPACE [33] та інші біоенергетичні трофодинамічні моделі (наприклад, [34], [35]).

Останнім часом використовуються моделі МЕ, що містять дескриптори клімату та описують вплив більш високих трофічних рівнів [36], [37]. Ці так звані «end-to-end» моделі, які зазвичай поєднують в межах єдиного комплексу суб-моделі фізичних та хімічних океанографічних процесів з суб-моделями організмів

високих та нижніх трофічних рівнів [37]. На теперішній час є кілька розроблених моделей, у тому числі OSMOSE [38], ECOSPACE, АТЛАНТИС та SEAPODYM. Нові розробки ведуться з розширення багатовидового різноманіття риби до рівня сімейства в моделях NEMURO. Хоча жодна з цих нових моделей не представляє всеосяжну модель, однак основні підходи, велика різноманітність та деталі забезпечують основу для розробки наступного покоління «end-to-end» моделей.

Окремо стоїть питання щодо інформаційних систем, які з одного боку дозволяють побудувати та верифікувати математичні моделі, а з іншого вирішити задачі з оцінки та діагнозу стану морських екосистем на більш якісному рівні.

В підрозділі здійснено аналіз достатності існуючих міжнародних інформаційних систем та математичних моделей для діагнозу та прогнозу динаміки екосистем ПО. Спочатку розглянуто міжнародні інформаційні системи. Потім моделі динаміки чисельності та біомаси промислових популяцій риб, які відносяться за типом до МРМ та МДС. І наприкінці розглянуті найбільш вживані в міжнародній практиці моделі МЕ та «end-to-end».

3.1 Інформаційні системи спостереження за Південним океаном

«Система спостереження за Південним океаном» (SOOS) - це міжнародна ініціатива SCAR та Наукового комітету з досліджень океану (SCOR) (рис. 10). Розроблена протягом багатьох років, SOOS була офіційно запущена наприкінці 2011 року з відкриттям Міжнародного проектного офісу, організованого Інститутом морських та антарктичних досліджень (IMAS) та Австралійською науково-дослідною радою Порталу партнерства в Антарктиці в Університеті Тасманії, Австралія. З тих пір SOOS створила мережу зацікавлених сторін та учасників, котрі працюють разом для досягнення мети та цілей, визначених спільноту.

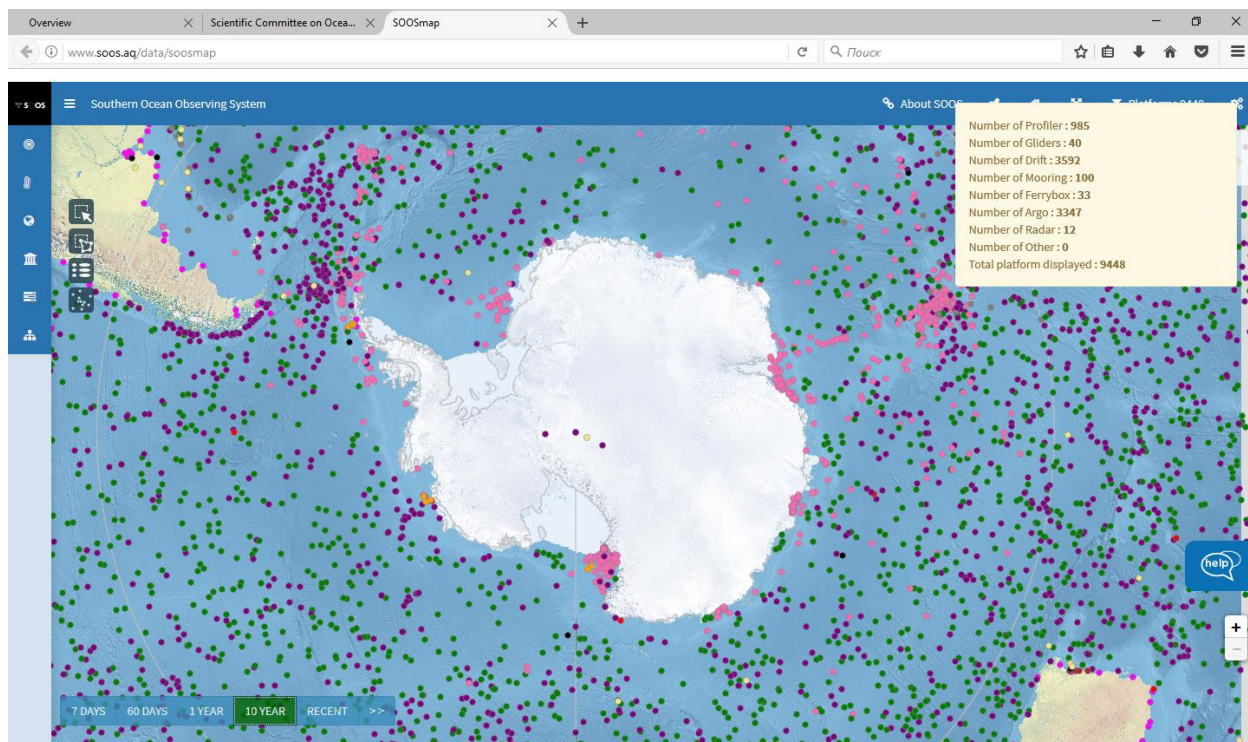


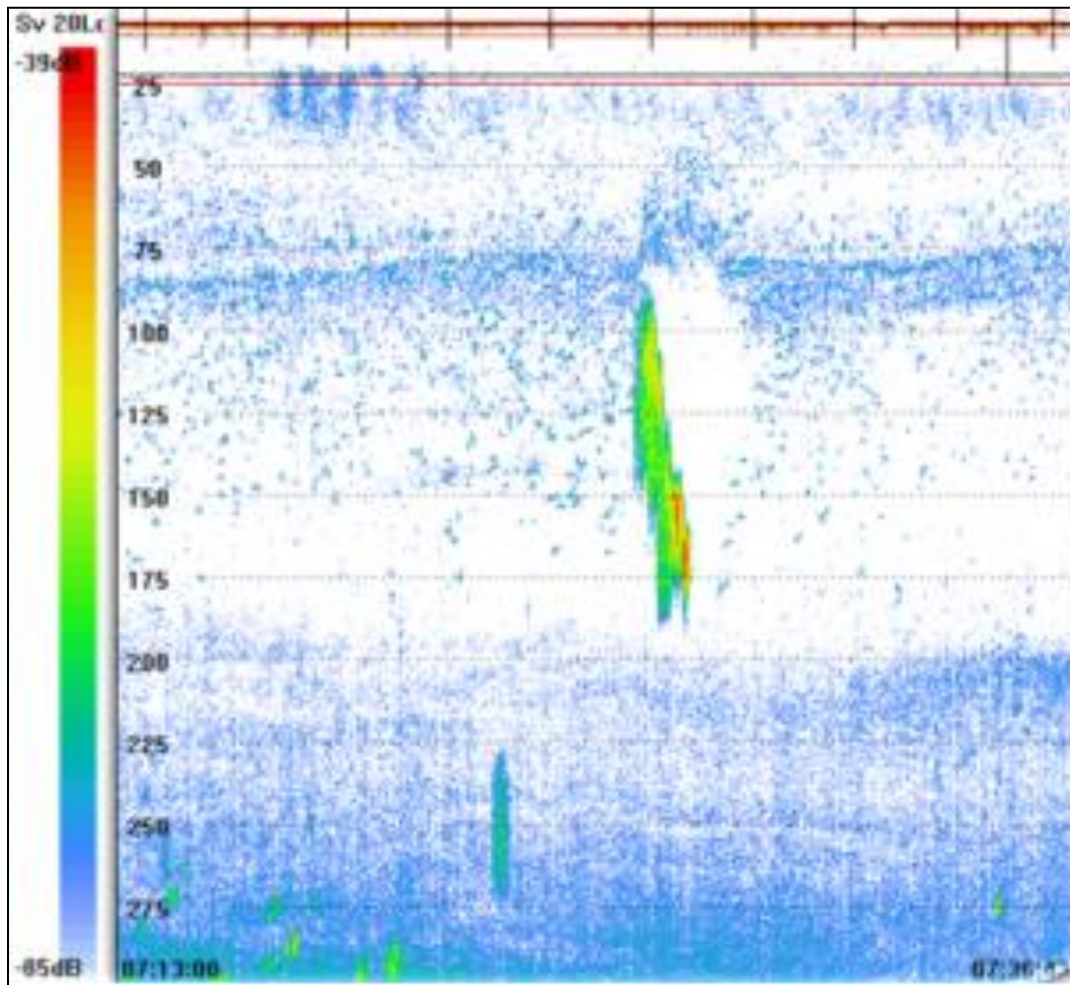
Рисунок 10 – Просторовий розподіл даних в системі SOOS [40]

Південноокеанічна мережа акустики (SONA) являє собою групу наукових інститутів та промислових партнерів, які об'єдналися для вимірювання невикористаного компонента екосистеми – «середньо-трофічного рівня», та узгодження загальних стандартів та протоколів для збору даних і обробки, з метою забезпечення цих даних на основі відкритого доступу.

Постійні спостереження є ключем для нашого розуміння природних причин і наслідків зміни ПО.

Процеси в ПО тісно пов'язані з деякими найбільш актуальними проблемами, з якими на сьогодні стикнулось суспільство: зміна клімату, окислення океану та стале управління морськими ресурсами.

Отримання активних акустичних даних є єдиним синоптичним підходом для моніторингу мезопелагічного шару океану, який відіграє вирішальну роль як у вуглецевому циклі Землі, так і в функціонуванні морської екосистеми. Така технологія стає більш зрілою, але все ще недостатньо розгорнутою, незважаючи на високу потенційну наукову цінність (рис. 11).



Примітка. На знімку можливо відображено косяки риб, що взаємодіють з зоопланктонним шаром.

Рисунок 11 - Знімок акустичного запису

Деякі інститути з Австралії та Європи збирають акустичні дані в ПО та розробили перші ініціативи щодо інтеграції цих ключових даних в веб-бази даних (IMOS, SOOS, SONA). Акустична база даних для громадського доступу Інтегрованої системи морського спостереження (IMOS) з пов'язаними документованими процедурами обробки та метаданими являє собою базову структуру, яка спирається на глобальні доступні акустичні дані для прийняття моделі. Стандарт метаданих Міжнародної ради з дослідження моря Робочої групи з акустики рибної промисловості, науки та технологій (ICES WGFAST) надає структуру для цих даних та дозволяє їм бути глобально видимими і корисними. На підставі цих розробок загальноприйнятий міжнародний стандарт методології

потребує доопрацювання для об'єднання та використання цих даних у моделях морських екосистем, включаючи функціональні групи мікронектону.

Ці моделі необхідні спершу для оцінки біомаси та динаміки ключових компонентів системи, а потім для надання відсутньої інформації щодо розуміння поведінки хижаків та екології, аналізу експлуатації морських ресурсів, таких що являються частиною мікронектону (наприклад, криля, мезопелагічної риби) або його хижаків (великі риби), і прогнозування впливу зміни клімату на екосистему та вуглецевий цикл.

Нові підходи в акустиці основані на використанні багаточастот, як особливо новий ехолот EK80, що встановлені або будуть встановлені на декількох дослідницьких суднах ЄС та Австралії, та повинні допомогти розрізнити різні групи мікронектону (наприклад, риба, криль, креветки, медузи, тощо). Розширення можливостей у визначенні груп мікронектону та харчового ланцюга в моделях повинно бути розроблено в тісному зв'язку з інформацією, наданою цими новими інструментами.

Фундаментальним для SONA є збір біоакустичних даних на одному (38 кГц) та/або декількох частотах (12; 18; 38; 70 кГц і 120; 200; 333 кГц) від існуючої міжнародної інфраструктури суден (науково-дослідні та промислові рибальські судна).

Ці судна переміщуються по регіонах екологічного та океанічного значення в ПО. Партнери проекту підписані на SONA, представлені міжнародними логістичними та рибальськими суднами (шляхом прямого обміну даними або через паралельні портали даних).

SONA зосереджується на обміні даними та забезпечення повного доступу до них. Всі акустичні дані, що зберігаються в SONA, управляються інститутами приймаючої сторони, але їх можна знайти через повноцінний веб-інтерфейс, доступний для пошуку.

Дані будуть об'єднані поетапно, через побудову наступної бази даних: Південно-Атлантичної наукової бази даних зворотного розсіяного акустичного випромінювання (SAS).

Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA), Інститут морських досліджень Норвегії (IMR) та Британська антарктична служба (BAS) взяли на себе зобов'язання проводити довготривалі обстеження криля за допомогою акустичних методів в трьох мезомасштабних дослідних районах у морі Скоша.

SONA об'єднає ці набори даних у загальні формати та опрацює їх, а також профінансує семінар, для забезпечення синтезу поточного розуміння мінливості середньо тропічного рівня в Південно-атлантичному секторі Антарктики.

SONA буде інтегрувати Південно-атлантичну гнучку (опортуністичну) базу даних з базою даних IMOS та іншими даними сектору Антарктики (наприклад, сектор Індійського океану з Інститутом досліджень розвитку Франції (IRD)) для розробки відкритого доступу до базового акустичного набору даних ПО. Приклад зібраних необроблених біоакустичних даних відображено на рис. 12.

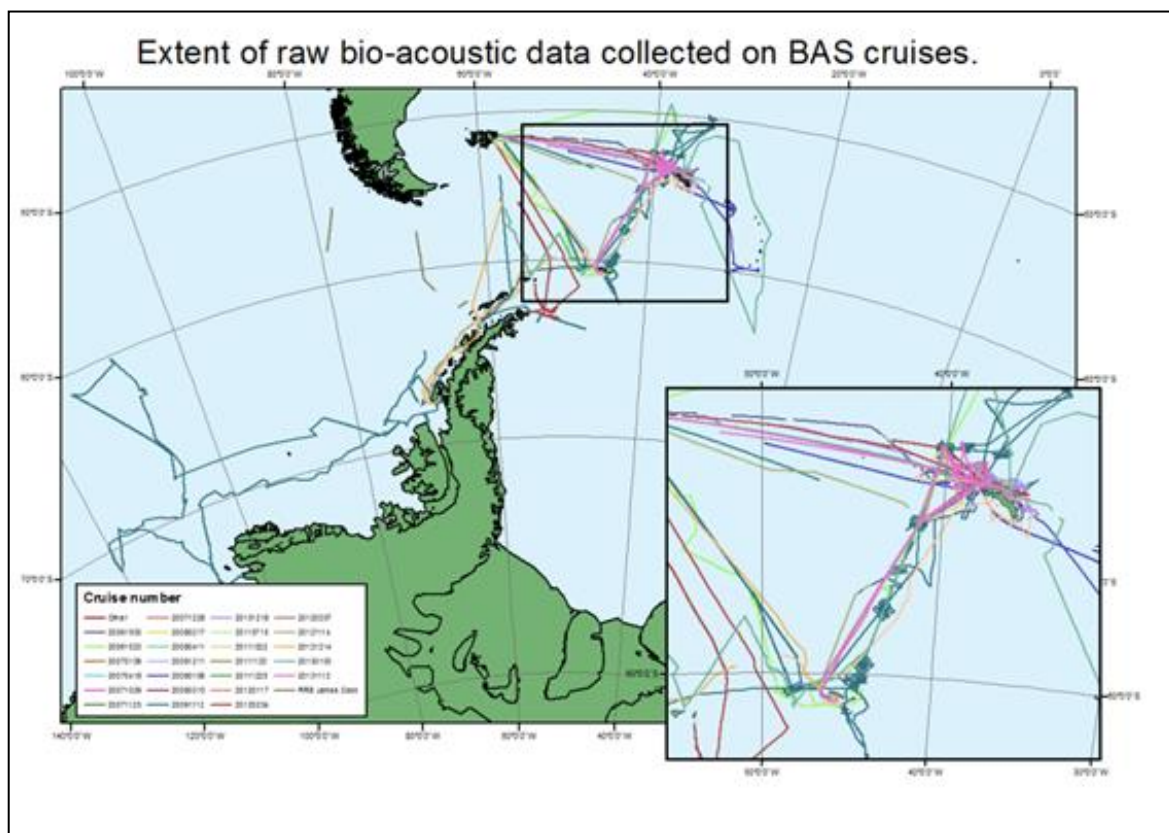


Рисунок 12 – Обсяг необроблених біоакустичних даних, зібраних в рамках BAS круїзів [41]

Спільнота Антарктики визнала цінність збирання та обробки каліброваних даних на загальних принципах (ICES, АНТКОМ).

3.2 Моделі динаміки чисельності та біомаси промислових популяцій риб

При вирішенні завдань прогнозування запасів сировинної бази рибальства і регулювання промислу виникає необхідність в таких математичних моделях, параметри яких можуть бути реально оцінені на основі доступної біологічної та промислової інформації. Це моделі динаміки чисельності або біомаси промислових популяцій. Термін «модель динаміки чисельності» не слід розуміти занадто широко – подібні моделі не претендують на опис і тим більше на пояснення всіх змін в чисельності та складі популяцій. Однак головні риси таких змін вони повинні описуватись вірно (зрозуміло, якщо закладені в них гіпотези вірні, то відображають уявлення про основні біологічні механізми регуляції чисельності).

У моделях динаміки чисельності в рибному господарстві найчастіше не враховується просторовий розподіл промислових об'єктів, а розглядаються сумарні чисельності або біомаси популяцій в цілому або окремо по вікових групах, при цьому беруться до уваги поповнення, зростання, природна і промислова смертність. Вплив абіотичних умов на популяційні процеси, як правило, не враховується, або описується побічно, через деякі параметри моделі.

Багатовидові моделі можуть враховувати трофічні взаємовідносини між видами, наприклад, розглянуті в попередніх розділах відносини хижака і жертви, або конкуренції. Багатовидові відносини іншого типу, звані технологічними, означають, що промисел однієї популяції впливає на стан інших популяцій або видів. Наприклад, знаряддя для лову захоплюють особин декількох видів, в цьому випадку постає завдання про розподіл промислового зусилля між вловлюваними видами, а також про вплив промислу на промислову смертність цих видів. Часто

зустрічаються ситуації, коли при спеціалізованому промислі одного цінного рибного запасу виловлюється другий вид, в якому рибалки менш зацікавлені. Якщо прилов викидається за борт і велика частина риби при цьому гине, це створює додаткову, так звану травматичну природну смертність цього виду, причому її величина залежить від промислового зусилля першого виду. Якщо ж прилов утилізується і його величина повідомляється промисловою статистикою, то прилов повинен бути доданий до загального улову другого виду, і при цьому необхідно скоригувати величину промислового зусилля, як-то поділивши її між видами.

В роботі висвітлені деякі підходи до багатовидового моделювання, основані на одновидовій моделі Шефера. Ця модель відноситься до типу продукційних моделей, в яких розглядається залежність загальної і додаткової продукції популяції від її біомаси. До цього типу моделей, які інші автори називають моделями додаткової продукції [42], а треті – моделями динаміки біомаси [43], першочергово відносили моделі однорідних популяцій, що не враховували розмірну або вікову структури. Пізніше продукційними моделями стали називати і моделі, які розглядають вікову структуру популяцій, якщо з їх допомогою будуються залежності рівноважного вилову (рівного продукції популяції) і рівноважного стану запасу від величини промислового зусилля або коефіцієнта промислової смертності. У даному звіті був представлений аналіз моделей однорідних популяцій і промислових угруповань додатково до проблем рибного господарства.

Більшість прикладних досліджень в цій області відноситься до ізольованих промислових популяцій. Моделі промислових угруповань, в яких істотну роль відіграє взаємодія видів, в рибному господарстві почали інтенсивно розроблятися тільки в середині 70 років ХХ століття і розвивалися вони на базі теорії рибальства однієї популяції. Тому необхідно коротко розглянути основні поняття і використовувані підходи базових одновидових моделей.

Продукційні моделі однієї ізольованої популяції спочатку призначалися для дослідження рівноважних станів запасу. Розглянемо докладно одну з найбільш

простих моделей цього типу – модель Шефера, яка оперує з найзагальнішими поняттями: запас і його промислова частина, улов, промислове зусилля. Ізольована однорідна популяція характеризується тільки біомасою як функцією часу $P(t)$ (t - час). Зміна біомаси відповідно до моделі Шефера відбувається відповідно до рівняння:

$$dP/dt = P(A - BP) - Y, \quad (3.1)$$

де P – біомаса;

t – час

A – параметр відносної миттєвої швидкості приросту біомаси при прагненні P до 0;

B – параметр, що характеризує внутрішньовидову конкуренцію або канібалізм;

Y – параметр миттєвого улову.

Тобто біомаса (P) передбачається безперервною функцією часу, а швидкість її зміни залежить від поточного стану біомаси. Постійні невід'ємні параметри A і B визначаються тільки внутрішніми властивостями популяції: за відсутності промислу біомаса зростає з плином часу за логістичним законом, прагнучи до граничної величини, рівної A/B , яка називається ємністю середовища. Параметр A являє собою відносну миттєву швидкість приросту біомаси при прагненні P до 0; параметр B характеризує внутрішньовидову конкуренцію або канібалізм, які лімітують ріст чисельності популяції. Внесок промислу в спад популяції моделюється останнім членом у рівнянні (3.1) – Y , який означає улов в одиницю часу або миттєвий улов. Іноді це рівняння пишуть в іншій формі:

$$dP/dt = Pr(1 - P/K) - Y, \quad (3.2)$$

(тобто $A=r$, $A/B=K$)

де A/B – ємність середовища.

На практиці при роботі з моделлю Шефера для оцінки її параметрів в якості вихідної використовують тільки промислову інформацію, а саме, дані про улови Y , що припадають на одиницю часу (зазвичай один рік) і про миттєві промислові зусилля E (тобто зусилля за ту ж одиницю часу). За цими даними розраховується

величина улову на одиницю промислового зусилля $u=Y/E$ (ця величина часто позначається як CPUE (catch-per-unit-effort) – вилов на одиницю зусиль). Запропоноване Ф.І. Барановим (1918 р.) співвідношення:

$$u=qP, \quad (3.3)$$

де u – індекс запасу;

q – коефіцієнт вловлюваності.

означає, що улов на зусилля є індексом запасу (передбачається, що коефіцієнт вловлюваності $q=const$), і дозволяє перейти від рівняння (3.1) до рівняння, що описує зміну u в часі:

$$du/dt = u(a - bu) - qEu, \quad (3.4)$$

де $a = A$;

$$b = B/q;$$

E – миттєві промислові зусилля.

Якщо річний вилов дорівнює приросту промислового стада за той же термін, то говорять про урівноважений улов і рівноважний стан популяції. Точніше, умова рівноваги означає, що $dP/dt=0$ і $du/dt=0$, так що в цьому випадку з формули (3.4) випливає співвідношення:

$$u=a-bE, \quad (3.5)$$

де $a = Aq/B$;

$$b = q^2/B.$$

Співвідношення з формули (3.5) означає, що відповідно до моделі Шефера, з ростом промислового зусилля лінійно зменшується індекс запасу. Більш складні залежності $u(E)$ прийняті в інших продукційних моделях, наприклад, в моделі Гаррода-Фокса описується експоненціальне зменшення u зі зростанням E . Відзначимо, що умова зменшення індексу запасу з ростом промислового зусилля є необхідною умовою доцільності застосування математичних моделей промислової популяції не тільки продукційних, але і когортних, тобто розглядають вікову структуру запасів.

У практичних розрахунках часто відштовхуються саме з гіпотези про рівноважний режим експлуатації запасу, а коефіцієнти a і b визначають за

допомогою стандартної процедури методу найменших квадратів або з рівняння (3.5), використовуючи багаторічні ряди значень E і u .

З точки зору обчислювальної процедури рівноважний або стаціонарний підхід привабливий своєю простотою. Цей шлях дозволяє також досить просто ставити і вирішувати завдання оптимального вилову – зокрема, розрахувати максимальний врівноважений вилов (MSY) і величину промислового зусилля E_{MSY} , при якій досягається MSY. Однак гіпотеза про рівновагу приросту і промислу служить одночасно і причиною серйозних недоліків такого підходу. Оскільки від року до року змінюються промислові зусилля, улови, а отже, і запас, то $dP/dt \neq 0$, і рівняння (3.5) перестає бути справедливим.

Прихильники рівноважного підходу, щоб виправдати застосування стаціонарних моделей, залучають додаткову гіпотезу про малу інерційність запасу, згідно з якою протягом року (від кінця одного промислового сезону до кінця наступного) популяція встигає стабілізуватися, пристосувавшись до нових умов промислу, тобто перейти в новий стаціонарний стан. При цьому, однак, параметри a і b передбачаються незмінними. Слабкість таких аргументів очевидна, і це змушує деяких дослідників шукати можливості модифікації традиційних (рівноважних) моделей динаміки чисельності, вводячи в них елементи динамічного процесу. Ці автори ввели додатковий постійний параметр, що має сенс «інерції» системи, який як би описує опір запасу введенню нового управління. Параметри моделі знаходяться за допомогою регресії улову на одиницю промислового зусилля на промислове зусилля, і новий параметр оцінюється ітераційно як величина, що забезпечує максимальний коефіцієнт кореляції рівняння регресії.

Модель Шефера використовують іноді і у вигляді диференціального рівняння (3.1) або рівняння (3.4). В цьому випадку процедура оцінки параметрів a , b , q ускладнюється присутністю у формулі (3.4) похідною du/dt , і доводиться констатувати, що методи, які застосовувалися до цих пір, призводять до ненадійних оцінок параметрів моделі. Пізніше з'явилися одновидові динамічні продукційні моделі. Огляд цих моделей наведено в книзі В.К. Бабаяна [44].

Наприклад, динамічна продукційна модель *В.К. Бабаяна* і *З.І. Кизнера* включає дві різні версії, які є розширенням рівноважних моделей Шефера і Фокса, відрізняються видом функції приросту біомаси запасу. Перша з них практично збігається з рівнянням (3.4). Параметризація цієї одновидової динамічної моделі та її дослідження проводиться за тими ж принципами, що і дослідження багатовидової продукційної моделі.

Оскільки промислові види, як правило, існують не ізольовано один від одного і часто взаємодіють, експлуатація одного з видів спільноти може впливати на результати промислу інших, тобто потрібна розробка і дослідження моделей множинного промислу, наближених до реальності. У зв'язку з цим потрібно мати на увазі, що чим складніше модель, чим більше вона включає структурних елементів і функціональних зв'язків, тим більше вихідних даних потрібно для її реалізації і тим детальніше необхідно розбиратися, наприклад, в питаннях поведінки, харчування, вікової структури модельованих видів риб. У той же час прості моделі, вірно відображаючи основні тенденції досліджуваних процесів, вимагають менше вихідної інформації і зазвичай менш чутливі до її якості.

Подібні міркування, ймовірно, зіграли не останню роль у тому, що розвиток прикладних досліджень з моделювання багатовидових експлуатованих спільнот морських організмів пішло по шляху прямого узагальнення традиційних одновидових моделей.

Розглянемо побудовану на базі моделі Шефера модель одного промислу, що експлуатує одночасно запаси двох біологічно невзаємодіючих видів:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P(A_1 - B_1P - qE \frac{P}{P+R}), \\ \frac{dR}{dt} &= R(A_2 - B_2R - qE \frac{R}{R+P}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

де P і R - чисельність або біомаса запасів кожного з виду.

Це найпростіша модель «технологічної» взаємодії двох видів, при якому коефіцієнти промислової смертності кожного виду вважаються пропорційними відносним часткам запасів цих видів в сумарному запасі. Точніше, величина

промислового зусилля розподіляється між видами пропорційно їх частці в загальному запасі за умови, що коефіцієнти вловлюваності видів q рівні.

Модель двох взаємодіючих однорідних популяцій, запропонована Дж. Поупом і О. Харрісом, являє собою систему двох диференціальних рівнянь (3.7), причому популяції можуть взаємодіяти по типу хижак-жертва або конкурувати за їжу, а тип взаємодії залежить від знаків параметрів c_i . Тут промислова смертність кожного виду визначається незалежними промисловими зусиллями кожного з двох типів промислу. Модель була застосована для двох конкуруючих за їжу популяцій Південно-Східної Атлантики - сардини і анчоуса (P - біомаса анчоуса, R - біомаса сардини):

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dt} &= P(A_1 - B_1P - C_1R) - F_A P, \\ \frac{dR}{dt} &= R(A_2 - B_2R - C_2P) - F_C R\end{aligned}\tag{3.7}$$

Вхідними даними для віртуально-популяційного аналізу (ВПА) є віковий склад уловів за ряд років. Шукані параметри продукційної моделі у рівнянні (3.7) визначалися регресійний методом за умови, що система знаходиться в стані рівноваги (тобто за умови $dP/dt = dR/dt = 0$). Такий метод оцінки параметрів не зовсім коректний, оскільки, з одного боку, методом ВПА визначається динаміка запасів, що суперечить прийнятій умові рівноваги системи, а з іншого боку, одновидовий метод ВПА не враховує міжвидових відносин і тому може давати зміщені оцінки запасів щодо реальної ситуації, яка повинна описуватися багатовидовою моделлю. Крім того, якщо в розпорядженні дослідників є інформація про віковий склад уловів популяцій, то на перший погляд немає необхідності використовувати продукційні моделі для опису динаміки популяцій. Проте, ці моделі можуть допомогти оцінити якість того чи іншого управління промислом і вибрати найбільш близьке до оптимального за обраним критерієм.

Оцінивши таким чином параметри моделі, автори побудували область допустимого управління на площині $\{F_A, F_C\}$ і показали, що на цій площині існують підобласті, де один або інший вид можуть зникнути, але існує і область, в якій обидві популяції можуть стійко існувати.

Отже, в обох випадках (моделі у рівняннях (3.6) і (3.7)) автори фактично обмежилися розглядом стаціонарних задач, тобто рівноваги системи запас-промисел.

К. Сулліван розробив продукційну модель трьох-видової спільноти Балтійського моря, яка включала одного хижака-тріску, два види жертв (салаку і шпрот) і канібалізм тріски. Вхідною інформацією для продукційної моделі є оцінки чисельності різних видів, які були отримані не за одновидовим ВПА, як в моделі *Поупа і Харріса*, а за допомогою багатовидового розмірного аналізу. Цей аналіз являє собою розширення розмірного одновидового аналізу *Джоунса*, який сам є моделлю рівноважного стану популяції. Для реалізації ж цього аналізу знадобилася додаткова інформація з харчування хижака. Передбачалося, що раціон хижака постійний і в ньому постійна частка рибної їжі. Рівень харчування і розподіл коефіцієнта смертності від хижаків $M2$ між видами жертв визначалися з річного раціону; склад їжі і розмірний пріоритет тріски, взяті з матеріалів робочої групи по багатовидовій оцінці запасів Балтики [45]. Функція *Урсіна* описує розмірний пріоритет (в формі логнормального розподілу), при цьому коефіцієнт харчової пріоритетності різних видів передбачається рівним одиниці, тобто хижацтво вважається залежним лише від розмірів харчових організмів.

У продукційній моделі спільноти Балтійського моря розглянуті два типи промислу – пелагічний для салаки і шпрот та донний – для тріски. Стан рівноваги для кожного нового значення F визначається ітераційно, причому одночасно проводяться ітерації декількох процесів:

- при нових значеннях F змінюються вилов і біомаса запасу кожного виду;
- рівень хижацтва і його вплив на молодь тріски та на інших жертв змінюються при зміні відносних розмірів тріски і її розподілу за розмірами.

Параметри моделі оцінюються за допомогою рівнянь багатofакторної регресії. Після оцінки параметрів рівняння для стану рівноваги системи мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{Y_C}{P_C} &= 0.354 - 0.148P_C + 0.05P_H - 0.125P_S, \\ \frac{Y_S}{P_S} &= 0.339 - 0.294P_C + 0.014P_H - 0.085P_S, \\ \frac{Y_H}{P_H} &= 0.191 - 0.145P_C + 0.019P_H - 0.085P_S\end{aligned}\tag{3.8}$$

де Y – улов відповідного виду;

P – біомаса рівноважного стану популяції;

C, H, S – індекси які відповідають виду риби: C – тріска (*cod*); H – оселедець (*herring*); S – шпроти (*sprat*).

Розрахунки показали, що в першому рівнянні два останніх доданків практично компенсують один одного, так як в середньому біомаса оселедця в два з половиною рази вище біомаси шпрот. Тому запас балтійської тріски добре описується одновидовою моделлю Шефера.

У рівняннях для оселедця і шпрот проявляються сильні взаємодії як з хижаком, так і між видами жертв. Коефіцієнт при P_C в другому рівнянні представляє собою частку біомаси шпрот (або оселедця - в третьому рівнянні), з'їденої одиницею біомаси тріски, і цей коефіцієнт для оселедця в два рази менше, ніж в рівнянні для шпрот, це означає, що шпрот має більш підходящі для тріски розміри, ніж оселедець. Рівень хижацтва по відношенню до оселедця і шпротів приблизно той же - але оскільки біомаса оселедця приблизно в два рази вище, то шпрот можна вважати кращим для тріски.

Коефіцієнт при біомасі шпрот P_S в рівнянні для оселедця характеризує опосередковану взаємодію між оселедцем і шпротом - через харчування хижака. При високому рівні інтенсивності промислу тріски її середній розмір зменшується, і шпрот стає більш придатним для тріски, при цьому зменшується вплив тріски на оселедець. І навпаки - при зменшенні інтенсивності промислу тріски середній розмір хижака збільшується, а більш велика тріска з'їдає більше оселедця, і при високій біомасі тріски це може привести до різкого зменшення біомаси оселедця (колапсу). Це той випадок, коли на перший погляд незрозумілі знаки при членах рівнянь, що описують взаємовідносини видів, можуть

пояснюватися поведінкою хижака при харчуванні, а саме його перемиканням на більш придатну їжу при зміні розмірного складу популяції хижака.

Трьох-видова продукційна модель *К. Суллівана* (1991 р.) теж є рівноважною моделлю.

У загальному випадку модель багатовидової спільноти, що складається з n -видів, являє собою, як правило, систему диференціальних або кінцево-різницевих рівнянь, що залежать від деяких параметрів. У простій ситуації, коли зміни чисельності (або біомаси) кожного виду описуються одним звичайним диференціальним рівнянням, така система може бути представлена у вигляді:

$$dP_i/dt = F_i(P_1, P_2, \dots, P_n, \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{im}) - Y_i; \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (3.9)$$

де $P_i(t)$ – кількість запасу i -го виду;

α_{il} – коефіцієнти i -го рівняння ($l = 1, \dots, m$), які вважаємо постійними величинами;

m – кількість постійних параметрів кожного рівняння системи;

F_i – деякі нелінійні функції відносно перемінних P_1, P_2, \dots, P_n ;

Y_i – миттєві улови i -го виду (улови, взяті в одиницю часу).

Така модель є динамічною (або нестационарною), оскільки розглядає зміну чисельності або біомаси в часі t , оскільки, як буде показано нижче, запропонований метод оцінки параметрів моделі враховує мінливість запасів.

Стаціонарні стани системи у рівнянні (3.9) відповідають умовам рівноважного промислу всіх експлуатованих видів спільноти. У цьому випадку рівняння моделі мають вигляд $F_i(t) = Y_i$, і метод визначення параметрів α_{il} моделі по промисловим даним принципово не відрізняється від описаного вище для рівноважної моделі Шефера. Однак більший інтерес представляють стаціонарні стани системи у рівнянні (3.9), параметри якої визначені з урахуванням динаміки всіх взаємодіючих запасів. Усюди в подальшому, де мова йде про стаціонарні стани системи, вони розуміються саме в такому сенсі.

Виходячи із загальної концепції моделі експлуатованої спільноти i , вибираючи в якості прообразу нестационарну одновидову модель Шефера

рівняння – (3.1), запишемо в якості прикладу основні рівняння взаємодії двох експлуатованих запасів P_1 і P_2 у вигляді:

$$\begin{aligned} dP_1/dt &= P_1(t)(A_1 - B_1P_1 - C_1P_2) - Y_1, \\ dP_2/dt &= P_2(t)(A_2 - B_2P_2 + C_2P_1) - Y_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Де константи A_i , B_i ($i = 1, 2$) невід'ємні і характеризують процеси всередині популяцій. Сенс параметрів A_i , B_i той же, що і параметрів A і B у рівнянні Шефера (3.1); параметри C_1 і C_2 характеризують міжвидові відносини. Умова $C_i > 0$ означає, що другий вид є хижак по відношенню до першого, а умова $C_1 > 0$, $C_2 < 0$ – що види є конкурентами. Насправді між видами можуть існувати взаємовідносини відразу двох типів, тоді знаки C_1 і C_2 говорять про те, яка з них превалує.

В реальних умовах важко оперувати такою величиною, як біомаса виду, оскільки її неможливо визначити безпосередньо з натурних даних без залучення додаткової інформації. Тому доцільно за допомогою співвідношень:

$$u_i = Y_i/E_i = q_i P_i, \quad (3.11)$$

перейти від формули (3.10) до рівнянь відносно індексів запасів, що виражають величини du_i/dtu_i через u_1, u_2, \dots, u_n і E_i [46]:

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dtu_1} &= a_1 - b_1 u_1 - c_1 u_2 - q_1 E_1, \\ \frac{du_2}{dtu_2} &= a_2 - b_2 u_2 - c_2 u_1 - q_2 E_2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $a_i = A_i$;

$$b_i = B_i/q_i;$$

u_1 і u_2 – улови на одиницю стандартизованого промислового зусилля;

$$c_1 = C_1/q_2;$$

$$c_2 = C_2/q_1;$$

E_1 і E_2 - величини стандартизованого промислового зусилля для промислу першого і другого виду.

Таким чином, оцінивши параметри a_i , b_i , c_i , q_i , можна відновити і величини параметрів A_i , B_i ; C_i вихідної системи у рівнянні (3.10).

В якості вхідної інформації для параметризації моделі використовується тільки інформація по промисловій статистиці, а саме по три тимчасові ряди для кожного включеного в модель запасу:

- улов на одиницю зусилля $u_i(t)$ для стандартного промислового комплексу (промисловим комплексом називаємо поєднання типу судна і типу знаряддя лову);

- стандартизоване промислове зусилля $E_i(t)$;

- відносна зміна улову на одиницю зусилля за інтервал між двома сусідніми моментами часу, найчастіше – за 1 рік.

$$\frac{du_i}{u_i dt} = \frac{u_i(t_k) - u_i(t_{k-1})}{u_i}, \quad (3.13)$$

Відзначимо, що саме використання часових рядів рівняння (3.13) робить наш підхід динамічним. Оскільки зазвичай промисел ведеться одночасно судами різних класів із застосуванням різнотипних знарядь лову, то всі три зазначених вище тимчасових ряди попередньо розраховуються.

В основу багатовидового аналізу віртуальних популяцій (MSVPA) покладені принципи побудови розрахунків одновидового ВПА, тому коротко опишемо ці принципи, хоча вони широко відомі і викладені, наприклад, в роботі *В.К. Бабаяна* зі співавторами (1984 р.) [44]. Ці моделі враховують вікову структуру популяцій, тому можна вважати, що вони точніше описують оригінал, ніж розглянуті вище моделі однорідної популяції.

При оцінці чисельності запасу за допомогою моделей типу ВПА використовуються дані вікового складу уловів, і кожне покоління розглядається (відновлюється) окремо, тому ці моделі названі когортними. В основу ВПА покладено припущення, що чисельність деякого покоління з часом зменшується по експоненті зі змінним показником експоненти $Z(t)$:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -Z(t)N(t), \quad (3.14)$$

де $Z(t)$ – коефіцієнт загальної смертності.

$Z(t)$ являється сумою двох складових, кожна з яких може бути функцією часу і віку:

$$Z(t,a) = M(t,a) + F(t,a), \quad (3.15)$$

У табл. 2 представлена структура матриці вікового складу уловів, вираженого в одиницях чисельності (наприклад, в 1000 екземплярів), тобто $C_{t,a}$ - кількість особин віку a , спійманих протягом року t . Крок зміни часу і віку дорівнює одному року. В даному прикладі мінімальний вік, який зустрічається в уловах рівний 3 рокам.

Таблиця 2 – Матриця вікового складу уловів при розрахунку чисельності по віртуально-популяційного аналізу

Рік промислу (k -го року)	Вік риб в улові (n -го віку)			
	3	4	5	...n
t	$C_{t,3}$	$C_{t,4}$	$C_{t,5}$	$C_{t,n}$
t+1	$C_{t+1,3}$	$C_{t+1,4}$	$C_{t+1,5}$	$C_{t+1,n}$
t+2	$C_{t+2,3}$	$C_{t+2,4}$	$C_{t+2,5}$	$C_{t+2,n}$
...t+k	$C_{t+k,3}$	$C_{t+k,4}$	$C_{t+k,5}$... $C_{t+k,n}$

Очевидно, що по будь-якій діагоналі таблиці стоять чисельності риб, взятих промислом в різні роки з одного і того ж покоління. При припущенні, що протягом часового інтервалу в один рік для кожного віку a параметри смертності не змінюються, можна записати ряд рівнянь, які використовуються для оцінки чисельності запасу по ВПА. Розрахунок ведеться для кожного покоління окремо, і для спрощення запису в рівнянні (3.16) опущений індекс року:

$$\begin{aligned} N_{a+1} &= N_a \exp(-Z_a), \\ C_a &= N_a \frac{F_a}{Z_a} (1 - \exp(-Z_a)), \\ C_a &= N_{a+1} \frac{F_a}{Z_a} (\exp(Z_a) - 1) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Друге рівняння системи у формулах (3.16) пов'язує величину річного улову, взятого з a -ї вікової групи (C_a), з чисельністю тієї ж групи на початку року, а третє рівняння виходить при підстановці N_{a+1} з першого рівняння в друге і відображає

залежність величини того ж улову від чисельності тієї ж вікової групи в кінці року, яка дорівнює чисельності наступної вікової групи на початку наступного року.

Одновидовий ВПА вимагає наявності наступної вхідної інформації:

- віковий склад уловів за ряд років;
- параметр природної смертності $M_{a,t}$ – в загальному випадку можна враховувати його залежність від віку і від часу, але часто приймається допущення, що цей параметр має одне і те ж значення для всієї промислової частини популяції;

- F_{st} – коефіцієнт промислової смертності найстаршої вікової групи обраного покоління, представлена в уловах;

- $w_{a,t}$ – середня вага особини віку a в рік промислу t ;

- темп статевого дозрівання.

Останні два параметри потрібні для розрахунків біомаси запасу. Розрахунки проводяться від старших вікових груп до молодших в наступному порядку:

а) спочатку для обраного покоління оцінюється чисельність найстаршої групи з індексом n на початку року за допомогою другого рівняння (3.16):

$$N_n = C_n \frac{Z_n}{F_n(1 - \exp(-Z_n))}, \quad (3.17)$$

б) для попередньої $(n-1)$ вікової групи по третьому рівнянню (3.16) методом послідовних наближень визначається величина F_{n-1} (оскільки цей параметр входить в рівняння і в лінійному вигляді і в показник експоненти);

в) по першому рівнянню (3.16) визначається чисельність N_{n-1} на початку року;

г) послідовно розраховуються коефіцієнти промислової смертності та чисельності для більш молодших вікових груп. Потім переходимо до наступного покоління.

В результаті розрахунків виходять матриці коефіцієнтів промислової смертності та чисельності для всіх років і віків, структура їх та ж, що наведена в табл. 2. Чисельність промислового запасу по роках промислу розраховується

підсумовуванням чисельності вікових груп по рядках, біомаса запасу виходить з множення чисельності вікових груп на $w_{a,t}$. Знаючи темп статевого дозрівання, можна оцінювати біомасу нерестового запасу. Таким чином, ВПА дає можливість отримати ретроспективні оцінки промислового і нерестового запасів.

Найбільш складним моментом методу ВПА являється визначення стартових значень промислової смертності. Розроблено кілька процедур їх оцінки, які названі налаштуванням ВПА. Найбільш часто вживані методи настройки описані *Дж. Поупом* і *Дж. Шепардом* (1985 р.). Для виконання цих процедур необхідна додаткова інформація, представлена у вигляді часових рядів диференційованих по віковим групам індексів запасу, які іноді вдається отримати за обліковими зйомками або за даними улову на одиницю промислового зусилля (так звані CPUE).

До когортних методів відноситься і метод розмірних когорт Джоунса, який застосовують для оцінки запасів в тих випадках, коли відсутні дані за віковим складом уловів, але доступні дані по розмірному складі для декількох років. Необхідною вхідною інформацією для цього методу є також параметри рівняння росту Берталанфі (залежності розміру особин від віку).

Одним з необхідних параметрів при оцінці запасів є коефіцієнт природної смертності M , який значно впливає на результати. Але цей параметр є і одним з найбільш складно визначних параметрів популяції. Причина цієї складності лежить в адитивному характері коефіцієнтів промислової і природної смертності – навіть якщо параметр Z оцінений, проблема полягає в поділі його на складові. Якщо, наприклад, оцінка параметра M завищена, то в розрахунках ВПА параметр F вийде заниженим, в результаті буде завищена оцінка запасу.

Існує кілька методів оцінки коефіцієнта природної смертності, при цьому найчастіше оцінюється його середня величина для промислового віку популяції. Оцінки коефіцієнтів природної смертності (або виживання) можна оцінювати і за допомогою мічення особин. При цьому слід враховувати і «витрати» мічення, а саме ймовірність втрати міток і додаткову смертність від мічення.

Основне положення багатовидового когортного аналізу, що позначається MSVPA, полягає в тому, що для кожного виду спільноти коефіцієнт природної смертності підрозділяється на дві компоненти:

$$M_{ia} = M2_{ia} + M1_{ia}, \quad (3.18)$$

де M – коефіцієнт природної смертності;

i – індекс виду;

a – індекс вікової групи.

Перший доданок у формулі (3.18) являє собою коефіцієнт смертності від хижаків особин вікової групи a виду i , а другий доданок – коефіцієнт природної смертності тієї ж вікової групи від всіх інших причин, який названий остаточною природною смертністю.

Н. Даан вперше поставив під сумнів гіпотезу про сталість у часі параметра смертності популяції від хижацтва $M2$. Цей параметр може залежати не тільки від віку особин, а також від чисельності та вікового складу популяцій хижаків. Міжрічна мінливість чисельності різних кормових об'єктів і їх споживачів також призводить до мінливості параметра $M2$. Таким чином, однією з цілей розробки моделі MSVPA було прагнення знизити невизначеність в використовуваних значеннях коефіцієнтів природної смертності і врахувати міжвікову та міжрічну мінливість цього параметру.

Велике значення для розвитку багатовидового моделювання мала робота *К. Андерсена* і *Е. Урсіна*, які запропонували дуже детальну математичну модель екосистеми, що включає різні трофічні рівні – від планктону до промислових риб; модель також описувала циркуляцію біогенів, стратифікацію вод, міграцію тварин та ін. Математичний апарат цієї моделі – диференціальні рівняння, як системи звичайних диференціальних рівнянь, так і в частинних похідних при описі неоднорідностей процесів, що відбуваються в океані. Цінність цієї моделі в тому, що її можна використовувати як довідник при моделюванні окремих процесів в екосистемі. Але велика кількість модельованих процесів і безліч невідомих параметрів не дозволяють використовувати її цілком в якості моделі екосистеми.

Хоча окремі блоки цієї моделі були застосовані і розвинені далі при моделюванні, наприклад, спільноти Балтійського моря.

Стартовою точкою для розвитку саме когортної моделі MSVPA прийнято вважати доповіді *Дж. Поупа*, а також *Т. Хелгасона* і *Х. Гісласона*, представлені на Щорічній науковій конференції ICES в 1979 р. Детальний опис алгоритму MSVPA приведено в роботі *Гісласона* і *Хелгасона* (1985 р.), а перша версія комп'ютерної програми запропонована *П. Спарре* (1984 р.). Потім програма багато разів удосконалювалась групою датських вчених.

У моделі MSVPA для кожного виду спільноти значення *M1* зазвичай повинні бути відомі заздалегідь, а значення *M2* оцінюються в рамках самої моделі.

3.3 Моделі програмного забезпечення для екологічного/екосистемного моделювання

В даному підрозділі описується функціональний склад і формат роботи безкоштовного набору програмного забезпечення для екологічного екосистемного/моделювання – «ECOPATH with ECOSIM» («EwE»). «EwE» має три основні компоненти: «ECOPATH» – статичний, масово-збалансований знімок системи; «ECOSIM» – компонент динамічного моделювання часу для дослідження політики; і «ECOSPACE» – просторово-часовий динамічний компонент, призначений, перш за все, для вивчення впливу та визначення розміщення природоохоронних територій. Програмний пакет ECOPATH може бути використаний для:

- адресування екологічних питань;
- оцінювання впливу на екосистеми від рибальства;
- дослідження варіантів політики управління;

- аналізу впливу та визначення розміщення морських природоохоронних територій;
- прогнозу руху та накопичення забруднюючих речовин та маркерів (Еко-маркер);
- моделювання впливу змін навколишнього середовища;
- сприяння побудови наскрізної моделі.

Останній випуск «EwE» – версія 6.5 був представлений в липні 2016 року.

Основою набору «EwE» – є модель ЕСОРАТН [31], [33], яка створює статичний, масово-збалансований знімок ресурсів в екосистемі та їх взаємодії, представлених трофічно пов'язаними біомасними «пулами». «Пули» біомаси складаються з одного виду або видових груп, що представляють екологічні співтовариства. Пули можна в подальшому розділити на групи, пов'язані з онтогенезом, які називаються «багатоступеневі стадії»: група може, наприклад, бути розділена на личинок, мальків, 1-2 річних особин та нерестовиків (віком 3+). Вимоги щодо даних ЕСОРАТН є відносно простими, і дані часто є доступними з оцінки запасів, екологічних досліджень чи літератури: оцінки біомаси, загальної оцінки смертності, оцінки споживання, структури харчування та вилову риби.

Параметризація моделі ЕСОРАТН базується на виконанні двох «основних» рівнянь. Перше рівняння описує, як може бути розділений термін продукування для кожної групи:

– *продукування* = вилов + споживання хижаками + чиста міграція + накопичення біомаси + інша смертність.

З цією метою модель ЕСОРАТН описує всі фактори смертності, звідси, «інша смертність» повинна включати лише загалом другорядні фактори, такі як смертність через старість, захворювання тощо. Друге «основне» рівняння ґрунтується на принципі збереження матерії всередині групи:

– *споживання* = продукування + дихання + незасвоєна їжа.

Загалом, модель ЕСОРАТН вимагає введення трьох з наступних чотирьох параметрів: біомаса, продукування/ коефіцієнт співвідношення біомаси (або загальна смертність), споживання/ коефіцієнт співвідношення біомаси, і

екотрофна ефективність для кожної з функціональних груп у моделі. Тут екотрофна ефективність виражає частку продукування, що використовується в системі, (тобто, він об'єднує всі умови продукування окрім «іншої смертності»). Якщо всі чотири основні параметри доступні для групи, програма може замість цього оцінити або накопичення біомаси або чисту міграцію. ЕСОРАТН встановлює серію лінійних рівнянь для вирішення невідомих значень, встановлюючи масову збалансованість в тій же операції. Підхід, ці методи, можливості та «підводне каміння» детально описані *Крістенсен* та *Уолтерсом* [47].

Процес побудови моделі ЕСОРАТН сам по собі надає цінний кінцевий продукт через докладний синтез роботи багатьох дослідників. Процес побудови моделі може об'єднати вчених, дослідників та урядові дані державного і федерального рівнів, міжнародні дослідницькі організації, університети, зацікавлені громадські групи та приватних підрядників. Основні результати включають як визначення прогалів в даних, так і спільні цілі між співпрацюючими сторонами, які раніше були прихованими або менш очевидними. Ми знаходимо цей процес особливо важливим для надання можливості зацікавленим групам взяти на себе відповідальність за отриману модель. Це особливо необхідно при експлуатації на рівні екосистем, де багатосторонні цілі політики повинні широко обговорюватися як частина процесу управління. Цьому сприяють методи дослідження політики, включені в модель ECOSIM, обговорені далі нижче.

ECOSIM забезпечує динамічну спроможність моделювання на рівні екосистеми з ключовими початковими параметрами, успадкованими від базової моделі ЕСОРАТН. Ключові обчислювальні аспекти наведено у стислому вигляді, серед них:

- використання результатів балансу маси (від ЕСОРАТН) для оцінки параметрів;
- змінна швидкості розщеплення дозволяє ефективно моделювати динаміку як «швидких» (фітопланктон), так і «повільних» груп (кити);

– вплив мікромасштабної поведінки на макромасштабні показники: контроль зверху-вниз або знизу-вверх включений в явному вигляді;

– включає динаміку біомаси та структуру розміру для ключових екосистемних груп, використовуючи набір диференціальних та різницевих рівнянь.

Як частина «EwE» включає:

– багатоступеневі стадії структури життєвого періоду за місячними рядами, щільністю та ризико-залежним зростанням;

– чисельність дорослих особин, біомасу, розрахунок середнього розміру за допомогою диференційних рівнянь затримки;

– поповнення популяції молоддю як «емергентна» властивість конкуренції / хижацька взаємодія мальків.

ECOSIM використовує систему диференційних рівнянь, яка виражає розмір потоку біомаси серед пулів як функцію часу зміни біомаси та коефіцієнтів видобутку, (для рівнянь див. *Walters* [32], [48]). Взаємодії хижак-здобич модерується поведінкою здобичі для обмеження впливу хижацтва, таким чином патерни потоку біомаси можуть показувати контроль або знизу-вгору або зверху-вниз (трофічний каскад) [48]. Виконуючи повторне моделювання, ECOSIM дозволяє встановлювати прогнозовану біомасу для даних часових рядів.

Таким чином, ECOSIM може об'єднувати (і дійсно виграє від цього) дані часових рядів:

– індекс відносного достатку (наприклад, дані обстеження, дані коефіцієнту улову на одиницю промислового зусилля);

– оцінки абсолютного достатку;

– вилови;

– навантаження флоту;

– норми вилову;

– оцінка загальної смертності.

Для багатьох груп, які будуть включені в модель, дані часових рядів будуть доступні з оцінки запасів окремих видів. Таким чином, «EwE» спирається на більш традиційну оцінку запасів, використовуючи більшу частину інформації, доступної з них, при інтеграції до рівня екосистеми.

Коли модель ECOSIM завантажена, ви можете завантажити часові ряди «довідкових» даних щодо відносної та абсолютної біомаси різних пулів протягом певного історичного періоду разом із оцінками змін у впливах риболовлі на цей період. Процедура підготовки/підбору використовує також дані часових рядів або промислового навантаження (чи механічну інтенсивність промислу) або промислової смертності риби, що є рушійними факторами для запуску.

Після того, як ці дані були завантажені та застосовані, кожного разу запускається ECOSIM, коли генерується статистична міра критерію згоди для цих даних. Ця міра критерію згоди – це зважена сума квадратичних відхилень (SS) логарифму біомаси від логарифму прогнозованої біомаси, масштабована у випадку даних відносної поширеності за максимальною оцінкою правдоподібності відносної поширеності масштабуючого множника q у рівнянні (3.19):

$$y = qB \quad (3.19)$$

де y – відносна поширеність;

q – масштабуючий множник;

B – абсолютна поширеність.

Модель дозволяє здійснювати чотири типи аналізу за допомогою вимірювань SS:

а) визначити чутливість SS до критичних параметрів вразливості ECOSIM, при незначній зміні кожного з них (1 %), потім перезапустити модель, щоб переглянути наскільки SS змінилися, (тобто, наскільки чутливими до вразливості є прогнози часових рядів, «підтримані» даними);

б) пошук оцінок вразливості, що дають краще «підібрати» ECOSIM до часових рядів даних (нижче SS), із вразливими місцями «заблокованими» користувачем в наборах, які, як очікується, будуть подібними;

в) пошук для значень часових рядів річної відносної первинної продуктивності, яка може являти собою історичну продуктивність «зміни режиму» впливу біомаси по всій екосистемі;

г) оцінити розподіл ймовірностей для нульової гіпотези, згідно з якою всі відхилення між моделлю та прогнозованою поширеністю обумовлені лише випадком, тобто за гіпотези, що немає реальних аномалій продуктивності.

Включення даних часових рядів у «EwE» полегшує їх використання для вивчення варіантів політики для екосистемного управління рибальством (виловом риби). Важливим попереднім висновком із заявок на різні екосистеми є те, що модель здатна виробити розумну підбірку (тобто підходить для того, що можна буде порівняти з тими, які отримані з використанням одиночних моделей видів) для всіх доступних часових рядів, пов'язаних із екологічними ресурсами екосистеми за один раз. Це вказує на здатність або, принаймні, потенціал для реплікації відомої історії екосистем. У свою чергу, це дає певну впевненість в тому, як модель може бути використана для вивчення політики. Це також визначає, що встановлення часових рядів в ECOSIM може використовуватися не тільки для ідентифікації екосистемних наслідків риболовлі, але також для вирішення питань екологічного впливу на рівні екосистем (так само як і для окремих груп курсу).

Головною метою управління рибним господарством є регулювання рівня риболовецької смертності з часом, щоб досягти цілей економічної, соціальної та екологічної стійкості. Важливим завданням динамічного моделювання та оцінки є також забезпечення розуміння того, наскільки високими ці показники смертності повинні бути, і як вони повинні змінюватися з часом (принаймні під час розвитку або відновлення після надмірного вилову). Ми не можемо очікувати, що моделі дадуть дуже точну оцінку оптимального рівня риболовецької смертності, але ми повинні, принаймні, мати можливість визначити обґрунтовані та оцадливі діапазони для норм.

ECOSIM передбачає два способи вивчення впливу альтернативної риболовної політики:

а) риболовні норми можуть бути «описані» з плином часу і результати (вловлювання, показники економічної ефективності, зміни біомаси) перевірятимуться на кожний опис. Це використання ECOSIM в «ігровому» режимі, де метою є заохочення швидкого вивчення варіантів;

б) формальні методи оптимізації можуть використовуватися для пошуку політики в області риболовлі, яка максимізує певну політичну ціль або «об'єктивну функцію» для управління.

Ці підходи можуть бути використані в комбінації, наприклад, здійснивши формальний пошук оптимізації, а потім «змінивши» оцінку норми риболовлі з цього пошукового запиту, щоб досягти інших цілей, окрім тих, які визнані під час процесу пошуку. Перший із цих підходів був реалізований в ECOSIM з моменту його першої версії і широко застосовувався для вивчення екосистемних наслідків змін у риболовецькому процесі. Другий – симуляція розвідки політики «відкритим циклом», яка визнає, що політика може бути визначена як підхід до досягнення широко визначеної мети, і що політика в області риболовлі часто реалізується через загально допустимі вилови (TACs), які перераховуються щорічно, а також через регулювання, яке впливає на структуру та розгортання флоту.

ECOSIM дозволяє користувачам реалізувати симуляцію розвідки політики «відкритого циклу», яка визнає, що політика може бути визначена як підхід до досягнення широко визначеної мети. Цільова функція для оптимізації політики визначається користувачем в ECOSIM, виходячи з оцінки чотирьох стратегічних цілей:

- а) максимізувати прибуток від рибальства;
- б) максимізувати соціальні виплати;
- в) максимізувати відновлення виду;
- г) максимізувати структуру екосистеми або «здоров'я».

Перша з них, максимізація прибутку, базується на обчисленні прибутку як вартості вилову (ставка ціни за видами), за вирахуванням витрат на промисел (постійні + змінні витрати). Забезпечення високої ваги для цієї мети часто

призводить до поступової відмови від більшості флотів, крім найбільш вигідних, і ліквідація екосистемних груп, що конкурують з/або наживаються на більш цінних цільових видів. Друга мета – максимізація соціальних виплат – виражається через підтримку зайнятості, яку підтримує кожен флот. Переваги розраховуються як кількість робочих місць відносно вартості лову, і є конкретними для флоту. Тому соціальні виплати значною мірою пропорційні рибальству. Оптимізація зусиль часто призводить до ще більш екстремальних (щодо переловів) сценаріїв рибальства, ніж оптимізація прибутку.

Третя мета – максимізація відтворення виду (або біоценозів), включає до обліку, те що зовнішній тиск (або правові рішення) може змусити політиків зосередити зусилля на збереженні чи відтворенні популяції певного виду в певній місцевості. У ECOSIM це відповідає встановленню порогової біомаси (відносно біомаси в ECOPATH) для виду чи групи, та оптимізації структури зусиль флоту, що найбільш ефективно забезпечить цю мету. Наслідки цього є конкретними: ми знаходимо, що процедура оптимізації може систематично обмежувати (за рахунок збільшення рибальства) конкурентів та хижаків відповідного виду, про яких йде мова; або з іншої крайності, що промисел може бути закритий без соціального або економічного відшкодування (як це часто трапляється у випадку прийняття юридичних аспектів).

Останнє завдання включає, максимізацію структури екосистеми (або «здоров'я»), яке сформувалось завдяки опису *Ю. Одума* екосистемної «зрілості», де у зрілих екосистемах переважають великі, довгоживучі організми. Значення за замовчуванням, яке було враховане для структури екосистеми, це коефіцієнт біомаси/продуктивності, специфічний для групи, оскільки цей показник свідчить про довговічність груп. Оптимізація структури екосистем часто означає зменшення промислу риби для всіх флотів, за винятком тих, що спрямовані на види з низькими ваговими факторами. Пошукова програма риболовної політики оцінює часові ряди відносних розмірів флоту, які максимізують багатокритеріальну цільову функцію.

ECOSPACE – це динамічна, просторова версія ECOPATH, яка включає в себе всі основні елементи ECOSIM. Вона динамічно розподіляє біомасу по карті з координатною сіткою (яка описується користувачем, і зазвичай визначається як 20 x 20 клітинок), з обліком:

а) симетричних рухів від елемента до його чотирьох сусідніх елементів, із швидкістю m , з характеристикою модифікації, яка визначає чи є елемент «бажаним середовищем існування» чи ні;

б) визначення користувачем збільшеного ризику для хижака та зниженого рівня інтенсивності харчування в небажаному місці проживання;

в) рівня риболовного промислу, пропорційного в кожному елементі, до загальної рентабельності риболовлі в цьому елементі, і розподіл яких також може бути чутливим до витрат (наприклад, для плавання до певних районів).

ECOSPACE, по суті, використовує часову динамічну модель ECOSIM в кожному елементі растрової сітки, одночасно враховуючи сполучення стільникових мереж та рухів риб. Риболовний промисел розподіляється в просторі згідно з гравітаційною моделлю, оптимізуючи прибуток, отриманий від риболовлі. Міграції риб та адвекції можуть бути точно змодельовані, а базова карта може бути заповнена просторовими шарами.

З огляду на структуру, ECOSPACE дозволяє користувачам вивчати потенційну роль МОР як інструмент пом'якшення, і, можливо, скасовувати різні екосистемні наслідки від риболовлі, особливо наслідки від «Риболовлі на морських трофічних ланцюгах». Отримані досі результати дозволяють припустити, що через вплив на трофічні каскади в межах МОР (як результат МОР, що захищають хижаків, чия біомаса таки збільшиться), і мережевих рухів хижаків до концентрацій продуктів харчування (наприклад, виключення МОР), мережевий ефект від малих МОР може бути у збільшенні вилову від рибальства, яке незмінно концентруватиме свою діяльність поблизу периметру. Лише великі МОР, з коротким зовнішнім периметром по відношенню до їх поверхні, будуть захищені від цього, як і МОР в бухтах або затоках, з обмеженою прилеглою територією для експлуатованих територій.

Два підходи для просторової оптимізації природоохоронних територій були впроваджені в ECOSPACE, і обидва вони базуються на максимізації цільової функції, що включає екологічні, соціальні та економічні критерії. З них, процедура відбору виділених елементів працює, оцінюючи потенційні елементи для захисту один за одним, вибираючи той, який максимізує цільову функцію, додає виділені елементи і продовжує повний захист. Інший – «метод Монте-Карло» (МК), який використовує вірогідну процедури відбору проб основу на шарах вагових значень збереження інтересу (аналогічно Марксану) для оцінки розміру та розміщення альтернативної охоронюваної території. Два підходи є альтернативними варіантами в загальному модулі просторової оптимізації, який використовує часову та просторову динаміку моделі ECOSPACE для оцінок. Оптимізація реалізується як компоненти підходу ECOPATH з ECOSIM та програмним забезпеченням. При вивченні проблеми, ми виявили, що може існувати зонування охоронюваної території, що підвищить економічні та соціальні чинники, яке не призведе до екологічного погіршення. Також можна простежити існування компромісу між включеними елементами, що представляють особливий інтерес до збереження, а також економічним та соціальним інтересом, і, хоча це не повинно бути загальною ознакою, це підкреслює необхідність використання методів моделювання для оцінки компромісу.

Цей метод оптимізації базується на попередньому дослідженні, в якому дуже проста схема оптимізації була використана для оцінки компромісу між часткою захищеної території та цільовою функцією на рівні екосистем. Загалом був змінений попередній підхід, що забезпечило кращий процес виконання програми, і, зокрема, змінюючи цільову функцію, розглядаючи лише прибуток від риболовлі та наявності значення біомасових груп. Процедура бере за відправну точку – позначення одного, декількох або всіх просторових елементів як «виділених елементів», тобто елементів, які слід розглядати як потенційно захищені елементи в наступній програмній ітерації. Потім процедура буде запускати модель ECOSPACE повторно між двома етапами часу, закриваючи

один з виділених елементів в кожному пробігу, одночасно зберігаючи значення функції цільової екосистеми. Виділений елемент, який призводить до найвищої цільової функції, потім закривається для риболовлі, а його чотири сусідні елементи (вище, нижче та з обох сторін) потім перетворюються на виділені елементи, крім як якщо вони вже є, або вже захищені, або є сухопутними осередками. Ця процедура триватиме, доки всі елементи не будуть захищені. Час, протягом якого процедура відбору запускається, вибирається залежно від програми. Як правило, модель екосистеми спочатку розробляється та налаштовується з використанням даних часових рядів, що охоплюють певний період часу, наприклад, з 1950 р. по 2005 р. Згодом модель використовується в режимі розробки сценарію для оцінки, наприклад, місця розташування захищених територій, що охоплюють період з 2006 р. по 2020 р. Основним результатом процедури відбору виділених елементів є оцінка компромісу між розміром охоронюваної території та кожною з цілей. Це може, наприклад, використовуватися для розгляду, яка частка загальної площі закривається в подальшому, більш детальному аналізі, заснованому на вибірці шару важливості.

Перевага методу моделювання виділених елементів, що описана вище, полягає в тому, що вона дозволяє провести комплексний огляд компромісу між часткою площі, закритою для риболовлі, та екологічною, соціальною та економічною вигодою та витратами на закриття. Це робиться, спираючись на інформацію, вже включену в підхід моделювання «EwE», і не вимагає нової інформації. Хоча це може бути перевагою з однієї точки зору, воно не дозволяє використовувати іншу форму для інформації, зокрема у формі геопросторових даних, таких як, наприклад, критичні шари ареалів риб з геоінформаційних систем (ГІС).

Для подолання цього недоліку була розроблена альтернативна процедура оптимізації моделі ECOSPACE, яка використовує просторові шари природоохоронного інтересу («значимі шари») для визначення ймовірності розгляду просторових елементів для захисту. Оптимізація виконується за допомогою методу МК, де «значимі шари» використовуються для початкового

вибору елементів у кожній реалізації МК. «Значимі шари» визначаються як растрові шари, розміри яких схожі на основні шари карти в базовій моделі ECOSPACE, тобто вони є прямокутними елементами в сітці з певною кількістю рядків і стовпчиків. Кожний елемент в даному шарі має певну «значимість» для збереження, виражену, наприклад, як «вірогідність настання» для вимираючих видів. Для кожного «шару значимості», ми спочатку масштабуємо значення «шару значимості», щоб підсумувати єдність, а потім обчислюється загальна вага та вага кожного елемента, а потім елемент з найбільшою вагою для даного шару. Специфічний для шару індикатор може отримати значення в діапазоні від 0 до 1. Для кожного пошуку оптимізації, потрібно вибрати пропорцію водних елементів для захисту при запусках, а також скільки разів повторювати запуски МК. Можна встановити процедуру пошуку для ітерації за низкою рівнів захисту, наприклад, від 10% до 100%, із захищених кроками в 10%. Подібно до процедури відбору виділених елементів, зазвичай розробляється і налаштовується модель на перший період часу, а потім використовується процедура відбору, щоб оцінити сценарії для охоронних територій протягом наступного періоду часу [33].

3.4 Екосистемна модель «АТЛАНТИС»

Екосистемна модель «АТЛАНТИС» – це гнучка, модульна структура моделювання, здатна виробляти реалістичні симуляції динаміки екосистеми. «АТЛАНТИС» служить інструментом стратегічного управління, здатним вивчати екологічні гіпотези, моделювати кліматичні сценарії та перевіряти вплив людини на навколишнє середовище, включаючи рибне господарство, зміни в землекористуванні, неточкові джерела забруднення (див. рис.13). Кодова база «АТЛАНТИС» була розроблена вченими Державного об'єднання наукових і прикладних досліджень (CSIRO) в Австралії [49]. «АТЛАНТИС» об'єднує фізичну,

хімічну, екологічну та риболовецьку динаміки в тривимірному просторовому просторі.

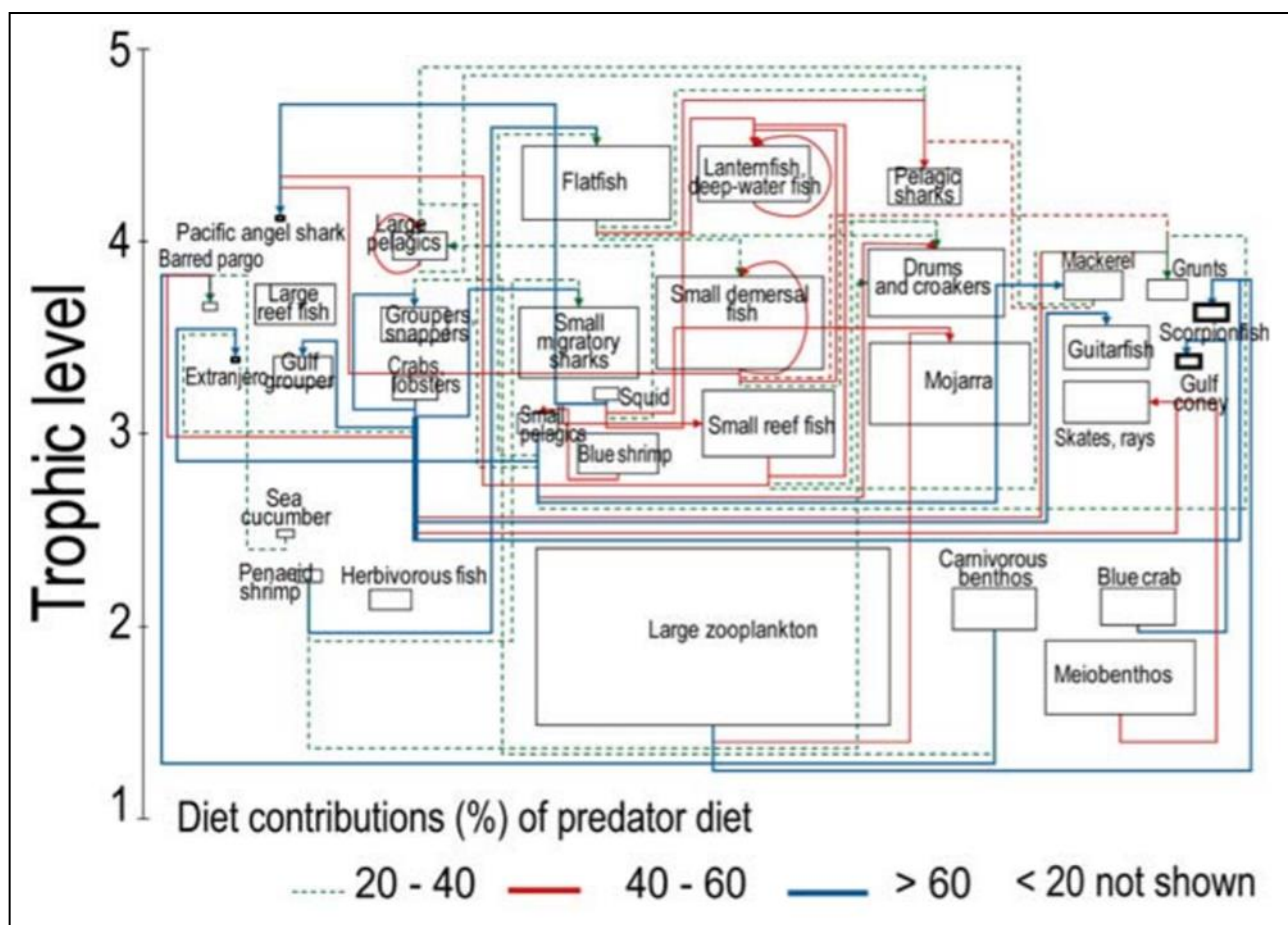


Рисунок 13 – Приклад взаємодії в харчових ланцюгах для Північної затоки Каліфорнії Структура моделі «АТЛАНТИС» [50]

У «АТЛАНТИС» користувач може вибрати рівень складності – від декількох груп з простими трофічними взаємодіями та простим рівнянням улову до екстенсивних моделей, зі складною структурою запасів, багаточисленними флотом, деталізованою економікою та багаторазовими діями управління (наприклад, динаміка екосистеми в «АТЛАНТИС» зображена на рис.14). Ця гнучкість та механістична основа є параметро-інтенсивною, роблячи перевірку часозатратною і виключає повну кількісну обробку параметрів невизначеності.

Станом на 2011 рік в Австралії та Північній Америці 13 моделей «АТЛАНТИС» були у користуванні, в тому числі в розробці знаходяться ще декілька (не менше 7).

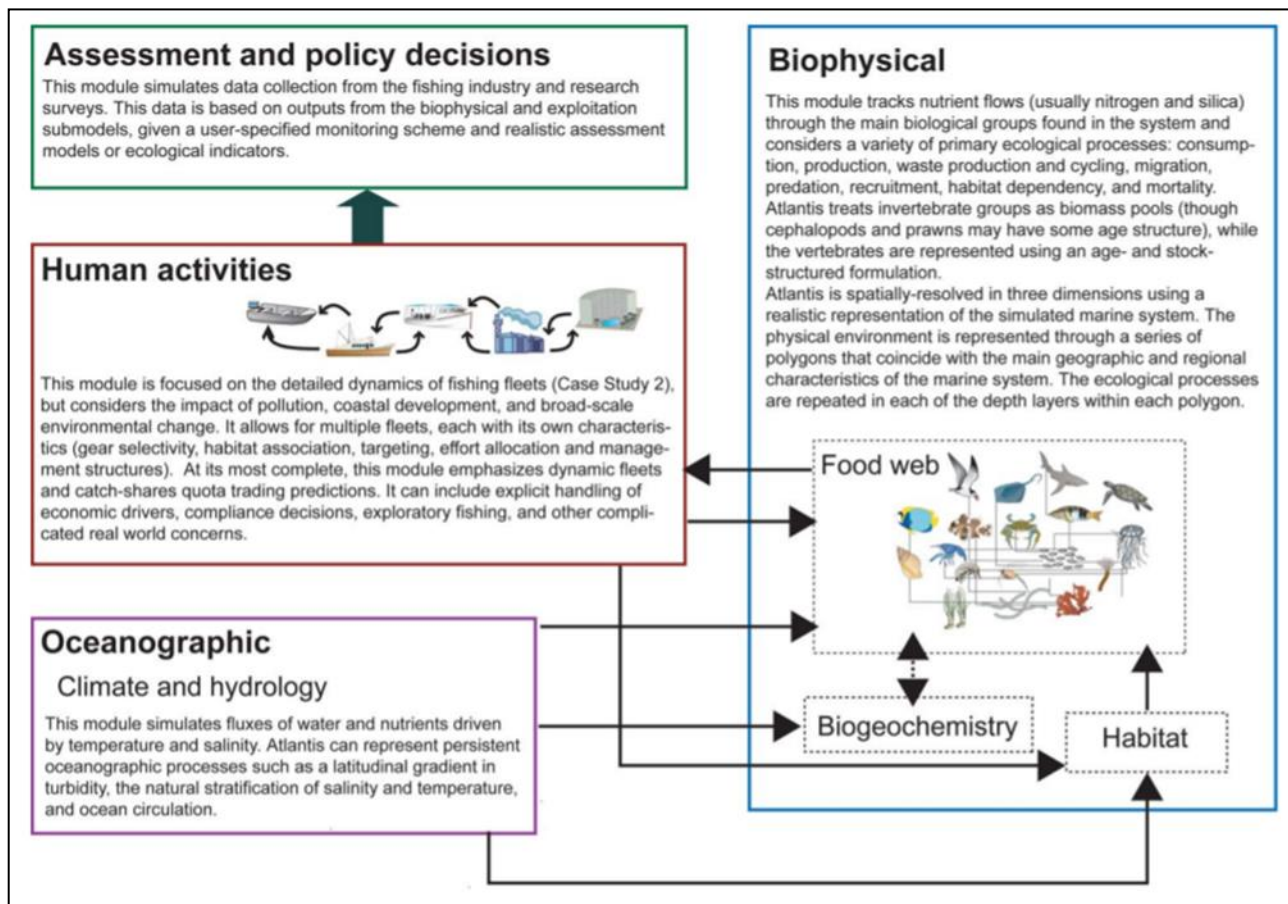


Рисунок 14 – Динаміка екосистеми в «АТЛАНТИС», яка представлена суб-моделлями [50]

«АТЛАНТИС» є ідеальним інструментом оцінки стратегії управління, коли політика управління та методи оцінки перевіряються на симуляції, які представляють реальну екосистему та її комплексність; вона не призначена для заміни традиційних оцінок запасів або прийняття короткострокових тактичних рішень (тобто загальних обмежень на вилов). Кодова база структури імітує динаміку екосистеми, вирішуючи набір диференціальних рівнянь на 12-годинному часовому кроці.

Ключові екологічні варіанти та припущення в «АТЛАНТИС» включають в себе: залежність від щільності руху, коли хижаки рухаються в райони з більш високим рівнем доступності їжі; вимушені міграції в модель предметної області та з неї (наприклад, для далеко мігруючих видів, таких як кити); відтворення на основі варіантів, які включають зв'язки поповнення запасів за моделлю Бевертона-Хольта (для риб) та фіксованого потомства/дорослих особин (для ссавців та птахів).

Хижацтво може регулюватися модифікованим *Holling* типом I, II або III функціональної відповіді з обмеженням ареалу, що дозволяє раціону хижаків змінюватися залежно від можливості полювання та протяжністю полювання, яка пов'язана з об'ємами хижаків. Вікова вага є динамічною, а це означає, що усвідомлені темпи споживання протягом всього модельованого періоду часу трансформуються у змінну вікову вагу кожної групи. На первинну продукцію впливає температура, світло та наявність поживних речовин, а також біогенні речовини та планктон, які постачаються нинішніми полями. Функціональні групи «АТЛАНТИС» включають хребетних, безхребетних, первинних продуцентів та три неживі групи.

У моделі використовується азот як загальна «валюта» між групами. Двоокис кремнію також динамічно обробляється, як і кисень, хоча і рудиментарно.

3.4.1 Модельні рівняння «основних продуцентів»

Первинні продуценти моделюються як об'єднаний пул біомаси в кожному просторовому елементі (тобто одиничний глибинний шар багатокутника). Щільність треків моделі ($mg\ N/m^3$) на елемент. Зростання біомаси обмежується наявністю біогенних речовин, світла та наявного простору. Біомаса втрачається на винищення хижакими, розпад, а також на лінійну і квадратичну смертність.

Лінійна смертність являє собою додаткову смертність незалежну від щільності, яка не моделюється явним чином.

Квадратична смертність – це залежна від щільності смертність (для випадків затінення). Швидкість зміни первинного продуцента (PX) для стандартного водного стовпа (w) становить:

$$\frac{d(PX_w)}{dt} = G_{PX_w} - M_{lys, PX} - M_{lin} - M_{quad} - \sum_{i = \text{predator groups}} P_{PX_w, i} \quad , \quad (3.20)$$

$$G_{PX} = \mu_{PX} \cdot \delta_{irr} \cdot \delta_N \cdot \delta_{space} \cdot PX \quad , \quad (3.21)$$

де PX – первинний продуцент;

G_{PX} – означає зростання PX ;

$M_{lys, PX}$ – це втрати внаслідок розпаду;

M_{lin} та M_{quad} – це втрати внаслідок лінійної та квадратичної смертності;

$P_{PX_w, i}$ – є втратами PX , обумовленого винищенням хижаками « i » видів;

μ_{PX} – максимальна швидкість росту;

δ_{irr} – обмеження світла;

δ_N – обмеження поживних речовин;

δ_{space} – обмеження простору.

Безхребетні моделюються як об'єднаний пул біомаси в кожному просторовому елементі. Щільність треків моделі ($mg N/m^3$) на келемент, основане на зростанні, винищенні хижаками, а також лінійній та квадратичній смертності. Квадратична смертність відображає ефекти, які залежать від щільності (винищення хижаками, хвороби), що явно не моделюються. Темп зміни для стандартного споживача безхребетних (CX) становлять:

$$\frac{d(CX)}{dt} = G_{CX} - M_{lin} CX - M_{quad} CX - \sum_{i = \text{predator groups}} P_{CX, i} - F_{CX} \quad , \quad (3.22)$$

$$G_{CX} = \left[\varepsilon_{CX} \cdot \sum_{i = \text{living prey}} P_{i, CX} + \sum_{j = DL, DR} (P_{j, CX} \cdot \varepsilon_{CX, j}) \right] \cdot \delta_{space} \cdot \delta_{O_2} \quad , \quad (3.23)$$

де CX – стандартний споживач безхребетних;

G_{CX} – зростання CX ;

M_{linCX} та M_{quadCX} – лінійна та квадратична смертність;

$P_{i,j}$ – хижацтво за групою « j » та групою « i »;

F_{CX} – риболовля в цій групі;

ε_{CX} – це ефективність росту CX при харчуванні живою здобиччю;

$\varepsilon_{CX,j}$ – ефективність при харчуванні детритом (DL розглядається окремо від DR);

δ_{space} – обмеження простору;

δ_{O_2} – обмеження кисню.

«АТЛАНТИС» відстежує чисельність, біомасу, вікову вагу та умови (резервна вага/структурна вага) кожної групи за часом, у кожному 3-му елементі і для всієї предметної області моделі. Кожна функціональна група має 10 вікових класів; ці класи представляють різні етапи життєвого циклу, так що для деяких груп це може бути один рік, тоді як для інших (довгоживучих) груп він може представляти десятиліття або більше.

Для кожного вікового класу та кожного просторового елементу, модель відстежує кількість особин та їх середню структурну вагу (кістки та тверді частини) та резервну вагу (м'які тканини). Ріст і чисельність – це функції поповнення, винищення хижаками, споживання та лінійної і квадратичної смертності. Використані характеристики хребетних тварин, можуть включати деякі первинні показники ефективності моделі:

а) порівнювані модельно-прогнозовані значення для структурної та резервної ваги щодо очікуваних величин, із очікуваними величинами від параметрів росту Бергаланфі (для вікової ваги);

б) зіставлення прогнозів зроблених для оцінки запасів (для необловлюваної чисельності). Темпи зміни для групи хребетних (FX) становлять:

$$\frac{d(FX_{i,s})}{dt} = G_{FX_{i,s}} \quad \text{і} \quad \frac{d(FX_{i,r})}{dt} = G_{FX_{i,r}}, \quad (3.24)$$

$$\frac{d(FX_i, d)}{dt} = T_{IMM, FX_i} - T_{EM, FX_i} - M_{lin, i} - M_{quad, i} - \sum_{j = \text{predator groups}} P_{FX, j} - F_{FX_i} \quad , (3.25)$$

де FX – група хребетних;

G_{FX} – зростання FX ;

T – означають рух риби до « $T_{IMM, Fxj}$ » і поза « $T_{EM, Fxj}$ » секції.

Нижні індекси при показниках означають наступне: « i » представляє вікову групу « i » (є одне рівняння для кожного вікового класу); « s » означає структурну вагу, « r » для резервної ваги та « d » для щільності.

Ріст (G) для кожної групи хребетних розраховується за рівняннями, подібними до тих, що застосовуються для безхребетних, але за віковою групою кожного хребетного. Результат потім розподіляється на структурну та резервну вагу, сприяючи поповненню запасів, коли тварина має недостаток ваги.

«Матриця доступності» описує темпи потоку речовин між функціональними групами, визначаючи внесок кожного типу здобичі в раціон хижаків та враховуючи ефекти пов'язані зі щільністю, як відповідають темпам взаємодії, режиму харчування хижаків, захисній поведінці здобичі та іншим факторам.

Концентрації азоту у водному стовпі (аміаку та нітрату) регулюються поглинанням автотрофами, екскрецією консументами, нітрифікацією та денітрифікацією. Темпи зміни аміаку (NH) у водному стовпі становлять:

$$\frac{d(NH_w)}{dt} = \sum_{i=PX_w} P_{NH_w, i} - P_{NH_w, MB_w} - P_{NH_w, MA} - P_{NH_w, PFB} + \sum_{i=CX_w, BF} E_i + \sum_{i=FX} E_i + \sum_{i=pelagic\ bacteria} E_i - S_{NIT, PAB} + R_{NET, w} \quad , (3.26)$$

де $P_{N, XX}$ – поглинання NH за допомогою автотрофів (або типових, мікрофітобентосу « MB » або морських водоростей « MA »);

E_{CX} – продукування NH консументами « CX »;

$S_{NIT, XB}$ – кількість NH, переробленої в NO під час нітрифікації бактеріями « XB »;

R_{NET} – кількість NH, виробленої денітрифікацією.

Повні описи динаміки інших форм азоту, кремнезему, бактерій, детриту та хімії осаду, так само як спеціалізованої параметризації для дінофлагелятів і макрофітів, містяться у працях *Фултона* та ін. [49], [51].

«АТЛАНТИС» застосовує фізичну океанографічну модель, яка керує системою «знизу-вгору». Рух води, потоки тепла та солоності через кордони, як правило, представлені поєднанням Регіональної системи моделювання океану (ROMS). ROMS – це модель циркуляції океану, яка забезпечує уніфіковану обробку поверхневих і нижніх граничних шарів та комплексний набір процедур для асиміляції даних.

Океанічні течії в поперечнику кожного елемента стикаються з поживними речовинами та безпосередньо впливають на доступність поживних речовин (NH_3 - аміак та NO_3 - нітрат) для первинних продуцентів; швидкість і напрямок океанічних течій також впливають на просторовий розподіл планктонних груп. Температурні поля з фізичної моделі впливають на біологічні процеси, такі як дихання та нерест. Солоність також може бути включена в фізичну модель і опціонально пов'язана з біологічними процесами. Гідродинаміка впливає на адвекцію груп планктону, концентрацію поживних речовин та кругообіг відходів.

Температура впливає на інтенсивність дихання кожної біологічної групи в «АТЛАНТИС»; кожна група також має визначену термічну толерантність та вузький тепловий діапазон для нересту. Швидкість потоку в поперечнику кожного елемента поживних речовин та планктонних груп, безпосередньо впливає на доступність поживних речовин (NH_3 та NO_3) для первинних продуцентів. Гідродинамічне нагнітання дозволяє перевірити наслідки, пов'язані з кліматичними змінами в підйомі глибинних вод на поверхню або прибережних течіях, на поживні речовини та первинну продуктивність.

Зростання хребетних залежить від параметрів росту по Берталанфі (*von Bertalanffy*), але варіюється в залежності від споживання. Функціональні відповіді альтернативних варіантів харчування існують в межах «АТЛАНТИС», в тому числі функціональна відповідь *Holling* типу I, II та III, або специфічний розмір *Holling* типу III, і обмежена функціональна відповідь.

Розмноження може бути змодельоване у двох різних етапах в «АТЛАНТИС». Для кожної функціональної групи, нерест відбувається протягом певного проміжку часу, а матеріали (азот), необхідні для розмноження, вилучаються з резервних азотних пулів, які включають як гонадну, так і соматичну тканину, таку, що зменшується з віковою вагою батьків.

Після нересту, кожна вікова категорія збільшується на один рік, а частка старшого класу гине.

Поповнення у популяції відбувається в певний час після нересту, і нові мальки потім причисляються до першого вікового класу. Час затримки між нерестом та поповнення у популяції відображає час осідання личинок для риби, інкубаційний період для птахів та період вагітності для ссавців. Поповнення у популяції може базуватися на безлічі альтернативних взаємовідносин, Модель Бевертона-Хольта - «Beverton-Holt» залежна від материнського стану (сталого, логнормального), від первинних продуцентів «*Chla*», та від всього планктону. Модель Бевертона-Хольта з логнормальною варіацією додає, при лінійній залежності від материнського стану, або форсує часові ряди поповнення популяції.

«АТЛАНТИС» проектує диференціальні рівняння вперед в часі, виходячи з набору екологічних параметрів та початкових умов (біомаси, вікова вагова та вікова чисельність). На відміну від статистичних моделей, таких як оцінки запасів, «АТЛАНТИС» не використовує автоматизовані алгоритми оптимізації для оцінки параметрів у моделі; замість цього, параметри виводяться за межі моделі перед початком симуляції. Проте повторюваний (циклічний) процес може бути використаний для налаштування або калібрування моделі, коригування параметрів для відтворення більш екологічно обґрунтованої динаміки та відповідності історичним спостереженням. Цей тип якісного регулювання параметрів є трудомістким, але дає розробнику моделей глибоке розуміння ключових параметрів та чутливості моделі.

Багатократне (циклічне) калібрування життєвої історії видів та параметрів харчування може складатися з трьох фаз: перша спрямована на коригування

вікової ваги та чисельності, щодо запобігання вимирання, потім для точного налаштування вікової ваги, і, нарешті, для подальшого калібрування біомаси, узгодження оцінки неексплуатованої біомаси, де це доцільно, для коригування параметрів поповнення популяції та смертності. Під час другої фази калібрування модель випробовується під різним ступенем тиску промислового навантаження для оцінки реакцій функціональних груп при збуреннях. Метою є перевірити чи змодельовані групи є так само продуктивними та стійкими, як і запропоновані іншими аналізами та польовими спостереженнями. Нарешті, оцінюється здатність моделі повторювати історичну динаміку біомаси під час історичного промислового навантаження.

Проект «Мезопелагічної здобичі та хижаків Південного океану» (MESOPP) працює на трьох різних моделях мікронектону. Одна з них – «АТЛАНТИС» з реалізацією в ПО розробляється Корпоративним дослідницьким центром «Клімат та екосистеми Антарктики», Австралійським антарктичним відділом та TACs.

«АТЛАНТИС» є рамочною моделлю, яка була розроблена для підтримки оцінки стратегії управління морськими системами та включає динамічні, інтегровані представлення про біофізичну систему, управління людськими ресурсами та гнучке (адаптивне) управління. Біофізична суб-модель «АТЛАНТИС» базується на системі нерегулярних просторових багатокутників або «елементів», в яких екологічні компоненти представлені як їхні пули біомаси або структуровані за віком популяції. Впровадження моделі «АТЛАНТИС» розробляється для Східної Антарктиди, зокрема для південної осі Кергелен, (Затока Прюдс і південне Кергеленське плато, від 50° сх.ш. до 110° сх.ш., від берега до 55° пд.ш.). Регіон осі Кергелен є найбільш важливим місцем для первинної продукції в Східній Антарктиді, який підтримує високі значення рибного промислу кликача і льодяної риби (на північному Кергеленському плато), і є важливим нагульним ареалом морських ссавців та птахів.

Впровадження «АТЛАНТИС» в Східній Антарктиці в даний час включає в себе біофізичну суб-модель із 43 функціональних груп через весь спектр трофічних рівнів (від бактерій до китів), 11 глибинних шарів і 24 багатокутники

(елементи). Вона також включає сезонний морський лід, який забезпечує функціонування середовища проживання та кругообіг поживних речовини. Структура, яка використовується, включає два мезопелагічних види: мігруючий та не-мігруючий. Акустичні дані можуть бути використані для оцінки передбачуваної біомаси мезопелагічних груп та, потенційно, інших груп мікронектону (серед зоопланктону та риби).

24 елементна ділянка вкладена в більшу ділянку (99 багатокутників), яка охоплює весь Індійський сектор від 30° сх.ш. до 175° сх.ш. (до 40° пд.ш.) та менша ділянка, призначена як основа для впровадження цієї великої моделі для всього регіону. Фізичне навантаження для цієї «АТЛАНТИС» моделі – це циркумполярна версія ROMS.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ ПІВДЕННОГО ОКЕАНУ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ДЛЯ СТАЛОГО ВИКОРИСТАННЯ ЖИВИХ

Для надання рекомендацій щодо моделювання динаміки екосистем ПО з урахуванням впливу кліматичних змін розглянемо роль математичного моделювання як одного з наукових напрямків в галузі управління морськими екосистемами.

Наука має невід'ємну роль в управлінні морськими екосистемами. На рис. 15 ілюструється зв'язок між наукою та політикою. Цілі політики забезпечують найвищий рівень вимог до взаємовідносин між політикою та наукою, з поділом від короткострокових тактичних потреб щодо управління поточними прямими взаємодіями між людьми та екосистемами (ліва половина діаграми) до стратегічних потреб для регулювання взаємодії людини з екосистемою у довгостроковій перспективі (права половина діаграми). Для тактичних потреб, наука прагне орієнтуватися на польові спостереження, оцінки стану та тенденцій екосистеми і впливів від діяльності людини. Для стратегічних потреб, наука на сьогодні більше зосереджена на процесах, таких як моделі, які можуть оцінити потенціал екосистем до змін, і до того які майбутні стани можуть виникнути. Проте наука не може бути чітко поділена між тактичними та стратегічними потребами. Кожна залежить від інших для формування порад.

Пріоритет для науки, який базується на політичних потребах, буде для дослідження, яке зменшує важливі невизначеності та прогалини в оцінках. Важливі невизначеності та прогалини є атрибутами оцінок, які значно знижують довіру до політичних органів, що досягають своїх цілей. При цьому, досягнення цілей високого рівня також визначатиметься спроможністю систем управління адаптуватися до невизначеностей в наявній науці.

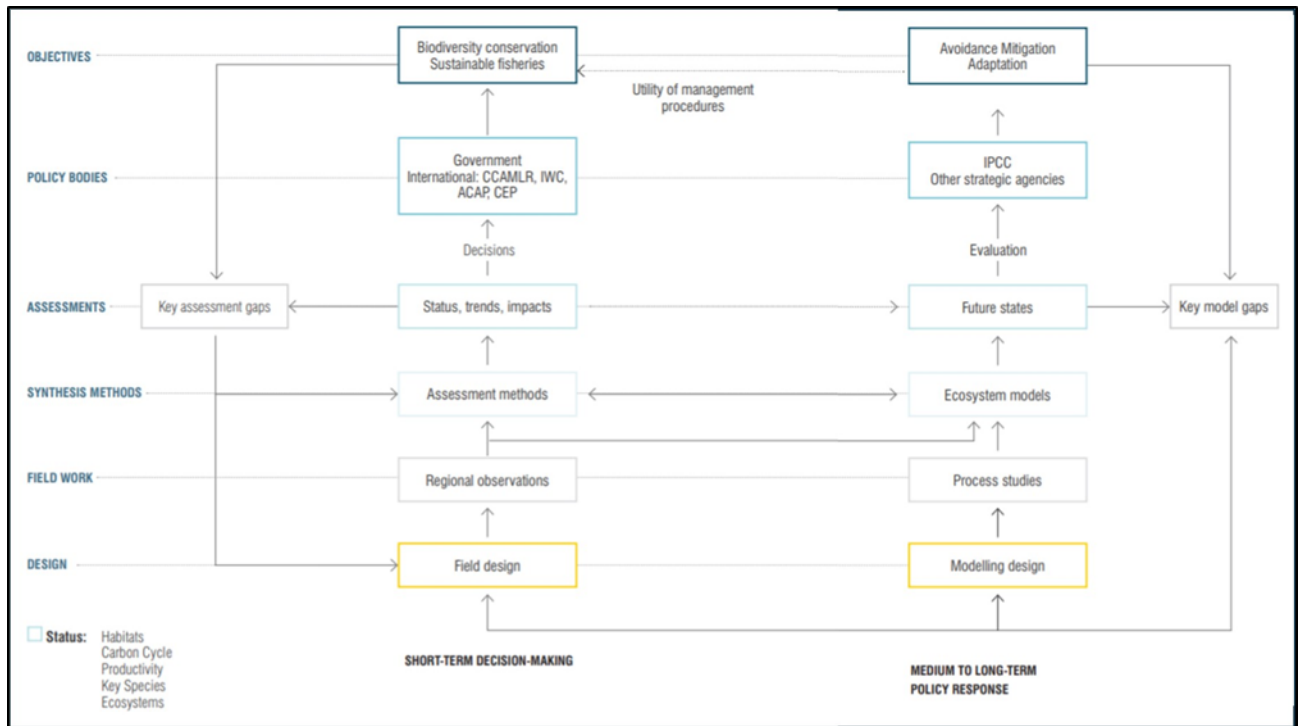


Рисунок 15 – Взаємозв'язки науки та політики в галузі управління морськими екосистемами [2]

Екосистемні цілі пов'язані з підтримкою статусу ключових атрибутів екосистеми (темно-сині прямокутники). Прогалини у можливостях оцінок та моделей, що допомагають політичним режимам (верхня половина), ведуть науку до підтримки політики (нижня половина). Ліва колонка діяльності пов'язана з короткочасним прийняттям рішень, тоді як права колонка стосується роботи з розробки середньо-довгострокових політичних заходів. Досягнення в політиці вимагають розробки та оцінки способів подолання прогалин, проведення польових та лабораторних робіт, розробки методів синтезу та оцінки, а потім проведення самостійних оцінок [2].

Математичне моделювання є одним із засобів вивчення того, яким чином ПО зазнає невинних змін. Оскільки в деяких регіонах екосистем ПО спостерігалися абіотичні та біотичні зміни протягом останніх десятиліть (наприклад, потепління, мінливість клімату, зміни морського льоду та велика кількість морських організмів), задача моделювання на екосистемному рівні та на

базі «end-to-end» моделей набуває все більшої актуальності. Як показує аналіз, основна біологічна інформація про таксономію багатьох організмів все ще відсутня в таких областях, як глибоководне дно або підльодне середовище. Крім того, існує потреба у знаннях щодо реакцій та стійкості морських екосистем Антарктики до змін. Необхідно продовжувати довгострокові зобов'язання і розробки та використовувати інноваційні технології для належного моніторингу екосистем ПО. Висвітлення найважливіших тем досліджень ПО дозволить визначити виклики та майбутні потреби в технологічному розвитку, а також стратегії досліджень та фінансування для різних зацікавлених сторін.

Необхідно продовжити вивчення ролі ПО в глобальних процесах на базі математичного моделювання. Вже відомо, що ПО відіграє ключову роль у різних світових циклах та ресурсах. Він є основним джерелом глобальної океанічної первинної продукції та біорізноманіття, експортує поживні речовини в світовий океанічний басейн, і робить внесок до глобальної системи течій стосовно передачі тепла і CO₂ від атмосфери до глибокого океану і O₂ в зворотному напрямку.

В останні 30 років у ПО відбувалися різноманітні регіональні зміни (наприклад, в температурі води, в течіях, стратифікації, переміщення в океанічних фронтальних місцях, збільшенні західних вітрів, зміни обсягів морського льоду з критичними наслідками для дикої природи, зміни в чисельності антарктичного крилю (*Euphausia superba*) [7], [9,] [19]. «Стабільність» Земної Системи (включаючи динаміку природного фону) знаходиться під загрозою, при цьому швидкість змін прискорюється (з ключовими елементами кліматичних змін та цілісності біосфери, які можуть привести Земну Систему до нового стану), припускаючи, що поточні зміни є лише незначними порівняно з очікуваними майбутніми тенденціями [52], [53]. Ці тенденції включають, зокрема, посилення океанічного потепління, широке зниження морського льоду, збільшення арагонітного недосичення (підкислювання) та взаємодії цих (та інших) факторів навколишнього середовища, що впливають на екосистеми ПО [19].

Хоча наше розуміння біологічних процесів ПО в останні роки значно покращилося, проте здатність організмів (на рівні популяції, спільноти та/або

виду) адаптуватися до змін та динаміка біологічних циклів залишаються погано зрозумілими. Однак додаткові натурні данні є необхідними для побудови більш детальних моделей, що дозволить прогнозувати біологічної реакції на передбачувані фізичні зміни [54].

На наш погляд необхідно зосередити увагу на наступних ключових завданнях математичного моделювання екосистем ПО:

- а) дослідження основних екосистемних процесів у ПО;
- б) вивчення структури харчового ланцюга та функціонування ПО;
- в) розробка системи прогнозування морських харчових ланцюгів ПО;
- г) розвиток математичного моделювання в методологічному та технологічному аспектах.

4.1 Дослідження основних екосистемних процесів у Південному океані

Безперервне потепління частин ПО вимагає оцінки не тільки підвищення температури, але й його впливу на інші фізичні та біологічні параметри.

Це особливо актуально для видів, ендемічних для ПО (характеризуються вузькими екологічними нішами), що можуть показати погану пристосованість/акліматизацію/пластичність до швидких екологічних змін. Ключовим питанням є визначення того, яким видам будуть загрозувати зміни через їх властиві фізіологічні обмеження. Очікується, що підвищення окиснення океанів (тобто зменшення pH морської води) глибоко змінить екосистеми ПО [55], але останні дані свідчать про те, що деякі антарктичні види можуть справлятися зі зниженим pH . Таксономія (систематизація) залишається ключовим підходом для виявлення змін у складі фауни, пов'язаних із процесами глобальних змін [56].

Визначення зв'язків між наземними та морськими системами, особливо в припливних (літоральній) і прибережних районах, де зменшення льодяного

покрову на суші може мати важливий вплив на місцеві морські екосистеми [19], [57], потребує подальших досліджень внаслідок передбачуваного підвищення рівня танення льоду, потенційного стоку прісної води з земної поверхні, та потенційного підвищення рівня моря [58]. На додачу, хоч і є свідчення про вплив льодовика на бентосні спільноти в локальному масштабі [59], важливо зрозуміти фактори, які можуть пояснити високу просторову плямистість (мозаїчність) бентосу, що населяє шельф Антарктики, у локальному та регіональному масштабах.

Моделювання синергетичного впливу багатьох стресових факторів навколишнього середовища, включаючи підкислення океану, седиментацію та гіпоксію на середовища існування бентосу. Така робота буде особливо складною, однак це є надзвичайно важливим для розуміння всіх екосистемних змін.

4.2 Вивчення структури харчового ланцюга та функціонування Південного океану

Деяка базова біологічна інформація про первинну продукцію, таку як зоопланктон, нектон та вищих хижаків з різних регіонів ПО все ще відсутня [60]. Контрольний параметр знань був зібраний через «Перепис морського життя» і його флагманський проект – 5 річний «Перепис морського життя Антарктики», який досліджував, між іншим, різноманітність, поширення, функціональне значення та чисельність морських організмів ПО, кульмінацією якого став Біогеографічний атлас ПО [61]. Проте існують значні прогалини щодо біології, поширення та різноманітності більшості морських груп. На сьогоднішній день, доступно дуже мало інформації з мікробної сфери (включаючи віруси), зокрема щодо їх поширення в екосистемах ПО та їх роль у постачанні та переробці органічних речовин у різних системних відділеннях.

Аналогічним чином ми знаємо дуже мало про життєвий цикл багатьох видів планктону та нектону (з яких велика кількість залишається невизначеними), особливо під морським льодом, на водній поверхні лід-океан та у відкритих регіонах океану, або про успішний набір будь-якої популяційної динаміки екологічно важливих таксонів (наприклад, головоногих або міктофідних палегічних риб). У цьому контексті, з точки зору харчового ланцюга, мезо- та вищі хижаки (наприклад, альбатроси, тюлені, пінгвіни) в даний час розглядаються як види-індикатори ранніх екологічних змін у ПО і використовуються як екологічні показники статусу нижчих трофічних рівнів [62].

Для бентосних морських екосистем важливо документувати та розуміти бентосне функціональне різноманіття та визначити екологічні рушійні сили різних спільнот. Які фактори навколишнього середовища відповідають за розвиток домінуючих спільнот фільтраторів шельфових середовищ існування? Чому «плями» таких скупчень знаходяться в градієнті від асоціацій, обмежених до декількох метрів, для екологічних регіонів, що тягнуться до десятків кілометрів? Більш того, існує потреба дослідити динаміку бентосних систем, включаючи сезонну мінливість, з метою картографування біорізноманіття і «гарячі точки» біомаси, так само, як з'ясувати обіг показників між трофічними рівнями та циклами поживних речовин на рівні спільнот, включаючи споживання, секвестрацію вуглецю та повторну мінералізацію. Деякі з цих викликів стосуються глибоководних екосистем [63], [64], в якому наше розуміння динаміки глибоководних організмів у фізично мінливому океані та при змінному кліматі є ключовим для оцінки ролі цих організмів. Глибоке море, де екологічні спільноти різноманітні, але в основному незвідані, представляє собою один з рубежів, які вивчатимуть у найближчі десятиліття як основу функціонування екосистеми [65] та де зміни у функціонуванні видів та структурі харчового ланцюга майже невідомі [60], [61]. Відносно стійкі глибоководні екосистеми ПО володіють величезним потенціалом для еволюційних досліджень, наприклад, у визначенні ключових чинників, що призводять до проявів видоутворення в цьому широкому середовищі. Більш того, важливо розуміти внесок до вилучення/переробки

вуглецю та поживних речовин різноманітними планктонними та бентосними спільнотами у глибоководному морі, на схилах та на/через багатий на біомасу шельф.

Тільки тоді, коли ці прогалини в знаннях заповняться, морські системи Антарктики можуть бути описані якісно і кількісно, і розглянуті в більш широкому контексті, що дозволить передбачати зміни в навколишньому середовищі.

4.3 Розвиток математичного моделювання в методологічному та технологічному аспектах

Майбутні вимоги до наук про життя в ПО та екологічних досліджень Антарктичного життя обмежені недостатністю авто-екологічних базисних даних для ключових морських організмів [28], особливо для мікроорганізмів, незважаючи на їх фундаментальне значення в функціонуванні екосистеми [66]. Існує набагато більше даних про поширення видів в порівнянні з тим, як вони функціонують та їх продуктивністю. Крім традиційних, але часто з методологічної точки зору складних задач – переписів/ даних по обліку чисельності, майбутні покоління вчених повинні будуть сприяти міжнародній координації для проведення довгострокових моніторингових програм та отримання біологічної інформації про погано вивчені види та їх взаємодію, або безпосередньо, або через використання екологічних показників видів. Ці довгострокові, багатонаціональні програми моніторингу також допоможуть покращити якість та відбір даних для наступних поколінь кліматичних моделей та моделей харчового ланцюга.

Точний вибір основних змінних екосистем океанів [7], наприклад, потрібний для надійного прогнозування регіональних або глобальних Антарктичних морських екосистем [67], [68].

Антарктичні екосистемні послуги стають все більш важливими і існує нагальна необхідність уточнення їх ролі та наслідків змін. Яким чином функціонування екосистеми формує екосистемні послуги? Який внесок робить це до глобального бюджету, або більш точніше, для ПО? МОР, які впроваджувались з різним успіхом повсюдно у світових океанах, можуть відігравати вирішальну роль у захисті навколишнього середовища ПО. Наша здатність впроваджувати, а потім визначити працездатність та ефективність МОР у захисті океанічних ресурсів є першорядною у забезпеченні їх сталого використання та, знову ж таки, вимагатиме довгострокового моніторингу. Для цього, вирішальним є також краще розуміння структурних та функціональних відмінностей між регіонами ПО.

Міжнародні організації, такі як SCAR та АНТКОМ, збирають експертні наукові групи, для яких моніторинг є ключовим питанням, необхідним для проведення наукових/академічних досліджень, сприяння збереженню видів, захисту територій та стійкості екосистем для життя в ПО. Нещодавно створена Міжнародна ініціатива SOOS¹⁾ у союзі з Глобальною системою спостереження за океаном²⁾ і Системою спостереження за глибоким океаном³⁾, спрямовані на координацію та розширення зусиль зі збору наукових даних у ПО та розробку узгодженої та ефективної системи спостереження, яка забезпечуватиме дані, необхідні для вирішення ключових наукових та соціальних проблем.

Поліпшення координації досліджень екологічних процесів може бути полегшено міжнародними ініціативами SCAR, такими як біологічні програми «Ant-ERA» – «Антарктичні пороги – стійкість та адаптація екосистем» (<https://www.scar.org/srp/ant-era>) та «AntEco» – «Стан Антарктичних екосистем» (<https://www.scar.org/srp/anteco>).

Відповідно до вимог та/або тиску з боку зацікавлених сторін, щоб забезпечити всебічні вивчення екосистем ПО, необхідно застосувати часто використовувану потребу на стандартизацію.

1) – <https://www.soos.aq/>

2) – <https://www.ioc-goos.org/>

3) – <https://www.ioc-goos.org/deepocean/>

Це стосується методів відбору проб, а також аналізів і стратегій, навіть у простих параметрах, таких як відсутність/наявність та чисельність. СЕМР доклала значних зусиль для вирішення даного питання та з 1987 року збирає дані про різні види навколо ПО [3]. Ці зусилля слід продовжувати та розширювати, заохочуючи дослідницькі групи використовувати СЕМР як стандартну процедуру для збору їх даних. Однак стандартизація та координація не повинні блокувати розвиток нових технологій та ідей, а лише доповнювати їх. Крім того, необхідно докласти зусилля для отримання комплексних результатів, які є репрезентативними для цілих спільнот чи трофічних компонентів екосистеми.

Аналогічним чином, виклики щодо проведення передової Антарктичної морської науки вимагають розробку мережі логістики та технологій, які поєднують нейронні мережі, координацію збору даних та широкий спектр пристроїв. Майбутні дослідницькі судна можуть мати сучасні прилади та лабораторне устаткування на борту, разом з наступним поколінням не-інвазійних технологій (наприклад, морські дистанційно керовані транспортні засоби, автономні підводні транспортні засоби, планери та дослідні мобільні апарати), а також вдосконалену технологію «Lander» (тобто будь-яка платформа, яка несе один або більше інструментів до морського дна, залишається там, доки вона не буде відновлена).

Більш того, автономні плаваючі профілі будуть і надалі надзвичайно корисними для збору цінної інформації та забезпечення довгострокових тенденцій у майбутньому [69], [70], [71], [72]. Використання таких даних, з тими можливостями, які отримані від супутників (завдяки підвищеній точності та погрішності) також допоможе збору інформації про океанічні процеси [73], [74], [75], [76], екологію та динаміку харчових ланцюгів [68], [76], [77], [78], [79]. Ці технології є ефективними та екологічно безпечними і значно покращать просторове та часове охоплення відбору біологічних та фізичних проб з ПО. Більш того, вони допоможуть обґрунтувати, те як потрібно збирати екологічні спостереження, та оцінювати Основні океанічні змінні (EOV's), які знаходяться в

центрі уваги великих Міжнародних антарктичних програм, таких як SOOS [80], [81].

Таксономічні описи нових видів, що забезпечують базисні знання, на яких будуються всі інші дослідження, повинні бути забезпечені, наприклад, через підтримку таксономістів та просування програм, таких як «Описової мови для таксономії», в поєднанні з молекулярними методами. Паралельно, технологічний прогрес і постійна мініатюризація дозволили створити пристрої для запису даних про тварин або пристрої для передачі даних [82], [83], які стануть більш корисними для моніторингу ширшого спектру параметрів на нижчих видах, без врахування несприятливих впливів. Прогнозована мініатюризація, одночасно з розширенням ринку для технологій збору даних призведе до розвитку все більш дешевих пристроїв. Це дозволить відкрити шляхи для широкомасштабних моніторингових операцій на циркумполярному рівні в найближчі десятиліття. Розробка нових сенсорів та бортових систем обробки даних передбачає для майбутніх досліджень, визначення на місці та збереження, з покращеною пам'яттю, інформації про навколишнє середовище в мілких масштабах, що забезпечить справжнє динамічне бачення стану ПО. Поєднання поведінки, пов'язаної з пошуком і добуванням корму, трофічних взаємодій та динаміки популяцій вищих хижаків, також буде суттєво сприяти розвитку більш ефективних моделей ланцюгів харчування, які мають вирішальне значення для оцінки життя в мінливому ПО. Універсальні моделі ланцюга харчування (наприклад, об'єднані разом в еволюційному контексті трофічні взаємодії, біорізноманіття, біотичні та абіотичні параметри), враховуючи попередні дослідження цього напрямку [84], [85], можуть бути розроблені для пояснення еволюційного походження вищого біорізноманіття в ПО, їх екологічного співіснування та майбутньої реакції на поточні екологічні зміни. Нарешті, безперервне вдосконалення для здійснення економічно-ефективної високопродуктивної молекулярної послідовності також вплине на різні дисципліни, включаючи біогеохімію, виходячи з даних попередніх робіт [86], [87].

4.4 Розробка системи прогнозування морських харчових ланцюгів Південного океану

Моделі як інструменти для прогнозування вже розроблені та доступні, хоча існує потреба у їх поліпшенні. З точки зору прогнозування морських харчових ланцюгів, задля покращення світового біологічного прогнозування (тобто прогнозування біологічних реакцій організмів на місцевих чи глобальних масштабах) [88], ми повинні мати можливість оцінити екологічні критичні точки екосистем ПО. Більш того, оцінка того, як ці критичні точки можуть вплинути на функціонування ПО, є актуальною проблемою на найближчі 20 років. З цією метою, окрім традиційного моніторингу, доведеться проводити експериментальні маніпуляції протягом тривалого періоду часу (наприклад, кілька десятиліть) на екологічних показниках видів (мається на увазі будь-які біологічні види, що визначають особливість чи характеристику навколишнього середовища) або груп видів.

Залишається проблемою включати параметри історії життя (наприклад, зростання, смертності) в моделі статичного розподілу видів, що корелює біогеографію з сучасними та майбутніми динамічними компонентами навколишнього середовища. Крім того, складно розглянути всі екологічно відповідні види або всю спільноту, під множинними, на противагу одиничним, стрес-факторами в моделях екологічного ризику. Особлива увага повинна приділятися інвазійним морським видам або корінним/місцевим видам, що розширюють їх біогеографічний діапазон і можуть стати причиною відхилення різноманіття, які порушить існуючу динамічну рівновагу між трофічними об'єднаннями.

Одне з питань, що представляють інтерес для керівників і розробників політики морських ресурсів Антарктики, стосується здатності диференціювати зміни в екосистемі та зміни викликані кліматом від наслідків риболовецької експлуатації. По відношенню до управління живими ресурсами ПО, перед

загрозою екологічних змін в найближчому майбутньому, АНТКОМ схвалила розробку стратегії управління зі зворотнім зв'язком. Ця система буде використовувати інформацію про статус екосистеми, щоб змінити рівень видобутку та просторового управління вилову арктичного криля. Такий підхід дає можливість зробити початкові спроби прогнозувати та відповідно реагувати на можливі наслідки зміни клімату [89] за допомогою сигналів від компонентів екосистеми, таких як мезо- та вищих хижаків. Подібні ініціативи повинні бути здійснені для інших видів, що експлуатуються в даний час, такі як кити та льодяні риби, при цьому необхідно терміново визначити прогалини знань в галузі екології видів, які можуть бути використані в майбутньому. Вже були продемонстровані можливості використання вищих хижаків Антарктики. Наприклад, ареали південних морських слонів «*Mirounga leonine*» охоплюють величезні території ПО, тому корисно досліджувати фізичні та біологічні зміни, що відбуваються в великому, віддаленому ПО протягом року [90]. Подальший розвиток у використанні вищих хижаків, як океанографічних зразків, беручи до уваги етичний інтерес, буде не тільки розглядати ключові питання щодо екології видів, але й буде важливим кроком до більш повного відбору проб та моніторингу ПО.

ВИСНОВКИ

Екосистеми Світового океану інтенсивно змінюються в результаті впливу низки природних та антропогенних факторів, що, в свою чергу, змінює структуру та рівень екосистемних послуг. Мінімізація таких впливів на екосистемні послуги є однією із пріоритетних задач для урядів всіх країн та міжнародних організацій.

Однією із найбільш уразливих екосистем Світового океану є екосистема ПО. Завдяки існуючим глобальним системам спостереження існує достатньо надійна інформація щодо показників біогеохімічного циклу ПО, а також розподілу та поширеності вищих хижаків, однак інформація про широкомасштабний розподіл середньо-трофічних рівнів є недостатньою.

Полярні екосистеми в даний час є найменш зміненими екосистемами на планеті – з точки зору прямого впливу поточної діяльності людини в регіоні – і можуть залишатися такими, якщо нинішні режими комплексного управління здатні відповідати вимогам щодо збереження змін екосистем у майбутньому.

Важливим завданням є визначення того, яким чином політичні та нормативно-правові засади зможуть знадобитися для своєчасної адаптації до можливих впливів, таким чином, щоб зберегти стійкість цих екосистем, зберегти екосистемні послуги та, при достатньому попередженні, мінімізувати швидкі потрясіння, в процесі того, як ми використовуємо ці екосистеми.

Для вирішення цих завдань будуть потрібні:

- надійні індикатори раннього попередження змін;
- надійна оцінка імовірності різних майбутніх станів екосистемних послуг з урахуванням різних варіантів управління або сценаріїв;
- механізми регулювання варіантів управління з урахуванням нової інформації.

Просторовий розподіл біотопів в ПО має широтну зональність з півдня на північ через переходи між континентальним шельфом Антарктиди, схилом, глибоким океаном і суб-антарктичними островами. Існує також поздовжня

зональність, пов'язана з підполярними морями Ведделла і Росса, Дугою Скоша в південно-західній частині Атлантики, Кергеленським плато в індійському секторі, хребтом Маккуорі та підводними горами на північ від моря Росса в секторі західного району Тихого океану.

На додачу до цієї топографічної багатокomпонентності є океанографічна багатокomпонентність, пов'язана з фронтами та зонами АЦТ, поточними системами морського шельфу, Північним субполярним циклонним круговоротом та широтною варіацією ряду інших факторів, найбільш помітних – температури, солоності та морського льоду. Взаємодія всіх цих чинників призводить до значної регіональної варіації в обох середовищах існування, так само як і у відмінностях впливу змін клімату на екосистеми.

В динаміці продуктивності та харчових ланцюгів в ПО переважають екстримальні сезонні коливання випромінювання та ходу морського льоду, разом з температурою, хімією карбонатів та освітленням через глибоке вертикальне змішування.

Поточні зміни та тенденції в екосистемах ПО змінювалися як прямий результат впливу людини з моменту майже повного знищення Антарктичних та субантарктичних тюленів, починаючи з 1800 років, продовжуючи до середини 20 століття надмірною експлуатацією багатьох видів китів та донних риб. ПО суттєво зміниться в найближчі десятиліття в результаті змін клімату.

Зміна клімату може призвести до змін у видовому різноманітті на нижчих трофічних рівнях, тим самим змінюючи продукування, яке досягає вищих трофічних рівнів. Це також може призвести до впливу на більш високі трофічні рівні, що змінить тиск хижаків на види більш низьких трофічних рівнів.

За збереження морських екосистем Антарктики відповідає АНТКОМ. Вона застосовує екосистемний підхід до управління. Це не виключає можливість ведення промислу, за умови що такий промисел здійснюється стійким чином і враховує вплив лову на інші компоненти екосистеми.

Для отримання інформації щодо стану довкілля АНТКОМ в 1989 р. створив СЕМР. СЕМР переслідує дві цілі:

а) виявляти і реєструвати значні зміни в основних компонентах морської екосистеми в межах зони дії Конвенції, що лежить в основі збереження морських живих ресурсів Антарктики;

б) встановлювати відмінність між змінами, викликаними промислом комерційних видів, і змінами, викликаними мінливістю навколишнього середовища – як фізичної, так і біологічної.

У програмі СЕМР використовуються наступні види-індикатори:

- пінгвін Аделі (*Pygoscelis adeliae*);
- антарктичний пінгвін (*P. antarctica*);
- папуаський пінгвін (*P. papua*);
- золотоволосий пінгвін (*Eudyptes chrysolophus*);
- чорнобривий альбатрос (*Thalassarche melanophrys*);
- антарктичний буревісник (*Thalassoica antarctica*);
- капський голубок (*Daption capense*);
- південний морський котик (*Arctocephalus gazella*).

Кліматичні моделі є основним інструментом для проведення якісних та кількісних оцінок можливих змін клімату в Антарктиці. Існує висока ступінь згоди щодо прогнозів, представлених існуючими кліматичними моделями, проте потрібні додаткові знання про такі ключові компоненти кліматичної системи Антарктики, як процеси, що відбуваються з морським льодом, прибережними океанічними водами і шельфовими льодовиками.

Всі основні сучасні кліматичні моделі, створені в приблизно 30 різних центрах моделювання по всьому світу, засновані на традиційних фізичних законах геофізичної гідродинаміки, таких як закони динаміки Ньютона. Однак обмеження по комп'ютерній потужності означають, що обчислення моделі все ж в цілому виконуються в значному масштабі для глобального моделювання, при якому атмосфера представлена у вигляді послідовності квадратів, величина яких в даний час складає 100 км. Таким чином, це представляє основну складність в реалістичному моделюванні явищ і фізичних характеристик меншого масштабу.

При допущенні антропогенного чинника середньої інтенсивності (тобто приблизно подвоєння концентрацій CO₂ на той час) існує високий рівень узгодженості між різними кліматичними моделями для наступних фактів:

- відбудеться підвищення середньорічної температури поверхні землі по всій Антарктиці (дві третини кліматичних моделей в діапазоні від 1,8 °C до 3,3 °C) [9];

- відбудеться збільшення середньорічної швидкості накопичення снігу на землі по всій Антарктиці (на 8 % та 18 %) [9];

- відбудеться відступ загального середньорічного морського крижаного покриву в Південній півкулі (на 24 % та 42 %) [9];

- відбудеться зменшення утворення прибережного морського льоду при одночасному збільшенні танення материкового льоду, що в сукупності призведе до ослаблення основної циркуляції вод Світового океану - термохалінної циркуляції [10];

- водні маси ПО, такі як АПВ, стануть теплішими і опрісненими, у міру того як щільності формування водних мас стануть значно нижче [11], [12]. АПВ важливі для зміни клімату, тому що саме в цих водних масах міститься найвища концентрація антропогенного CO₂ [13];

- підвищення кількості снігу, що випав, буде супроводжуватися збільшенням швидкості витрати льоду [14], [15]. Таким чином, на негативний вплив підвищеної кількості снігу, що випав, на рівень моря може здійснювати протидію підвищення швидкості потоку льоду і збільшення стоку материкового льоду в океан.

Безумовно всі ці процеси вплинуть на флору та фауну ПО, що, в свою чергу, вплине на важливі глобальні послуги екосистем. До них відносяться: виділення кисню; поглинання CO₂; круговорот поживних речовин; забезпечення кормових територій для таких широко поширених тварин, як кити і морські птахи, а також виробництво біологічних продуктів для споживання людьми. Тому вразливість морських організмів в результаті кліматичних змін є дуже серйозною проблемою і визначається як сприйнятливості таких організмів до відповідної

зміни клімату і відсутність можливостей справлятися з цим явищем і адаптуватися до нього.

Для вирішення задач охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів ПО використовуються математичні моделі з рівнем складності залежного від складності обраних задач.

Моделі, у яких представлена лише одна з складових всієї екосистеми, називаються «мінімально реалістичними моделями» і зазвичай фокусуються на внутрішньо-видових взаємодіях одного або кількох видів організмів.

ME – це моделі, в яких беруться до уваги всі трофічні рівні в екосистемі. Найбільш відомі з них та такі, що широко застосовуються: ECOPATH, ECOSIM та ECOSPACE.

Останнім часом використовуються моделі морських екосистем, що містять дескриптори клімату та описують вплив більш високих трофічних рівнів. Ці так звані «end-to-end» моделі, зазвичай, поєднують в межах єдиного комплексу суб-моделі фізичні та хімічні океанографічні процеси з суб-моделями організмів високих та нижніх трофічних рівнів. На теперішній час є кілька розроблених моделей, у тому числі OSMOSE, ECOSPACE, «АТЛАНТИС» та SEAPODYM. Нові розробки ведуться з розширення багатовидового різноманіття риби до рівня сімейства в моделях NEMURO. Хоча жодна з цих нових моделей не представляє всеосяжну модель, однак основні підходи, велика різноманітність та деталі забезпечують основу для розробки наступного покоління «end-to-end» моделей.

Окремо стоїть питання щодо інформаційних систем, які з одного боку дозволяють побудувати та верифікувати математичні моделі, а з іншого – вирішити задачі з оцінки та діагнозу стану морських екосистем на більш якісному рівні.

Оскільки в деяких регіонах екосистем ПО спостерігалися абіотичні та біотичні зміни протягом останніх десятиліть (наприклад, потепління, мінливість клімату, зміни морського льоду та велика кількість морських організмів), задача моделювання на екосистемному рівні та на базі «end-to-end» моделей набуває все більшої актуальності. Як показує аналіз, основна біологічна інформація про

таксономію багатьох організмів все ще відсутня в таких областях, як глибоководне дно або підльодне середовище. Крім того, існує потреба у знаннях щодо реакції та стійкості морських екосистем Антарктики до змін. Необхідно продовжувати довгострокові зобов'язання і розробки та використовувати інноваційні технології для належного моніторингу екосистем ПО. Висвітлення найважливіших тем досліджень ПО дозволить визначити виклики та майбутні потреби в технологічному розвитку, а також стратегії досліджень та фінансування для різних зацікавлених сторін.

Для вивчення ролі ПО в глобальних процесах на базі математичного моделювання необхідно опиратись на вже відомі факти. Відомо, що ПО відіграє ключову роль у різних світових циклах та ресурсах. Він є основним джерелом глобальної океанічної первинної продукції та біорізноманіття, експортує поживні речовини в світовий океанічний басейн, і робить внесок до глобальної системи течій передачі тепла і CO_2 від атмосфери до глибокого океану та O_2 в зворотному напрямку.

На наш погляд необхідно зосередити увагу на наступних ключових завданнях математичного моделювання екосистем ПО:

- а) дослідження основних екосистемних процесів у ПО;
- б) вивчення структури харчового ланцюга та функціонування ПО;
- в) розробка системи прогнозування морських харчових ланцюгів ПО;
- г) розвиток математичного моделювання в методологічному та технологічному аспектах.

Визначення зв'язків між наземними та морськими системами, особливо в припливних (літоральній) і прибережних районах, де зменшення льодяного покриву на суші може мати важливий вплив на місцеві морські екосистеми, потребує подальших досліджень внаслідок передбачуваного підвищення рівня танення льоду, потенційного стоку прісної води з земної поверхні, та потенційного підвищення рівня моря. Особливу увагу необхідно приділити моделюванню синергетичного впливу багатьох стресових факторів навколишнього середовища, включаючи підкислення океану, седиментацію та

гіпоксію на середовища існування бентосу. Така робота буде особливо складною, однак це є надзвичайно важливо для розуміння всіх екосистемних змін.

Універсальні моделі ланцюга харчування повинні бути розроблені для пояснення еволюційного походження вищого біорізноманіття в ПО, їх екологічного співіснування та майбутньої реакції на поточні екологічні зміни. Нарешті, безперервне вдосконалення для здійснення економічно-ефективної високопродуктивної молекулярної послідовності також вплине на різні дисципліни, включаючи біогеохімію.

З точки зору прогнозування морських харчових ланцюгів, з метою покращення світового біологічного прогнозування (тобто прогнозування біологічних реакцій організмів на локальних та глобальних масштабах), ми повинні мати можливість оцінити екологічні критичні точки екосистем ПО.

На теперішній час АНТКОМ схвалено розробку стратегії управління зі зворотнім зв'язком. Ця система повинна будуватись на системах спостереження та математичного моделювання екосистем ПО.

Такий підхід дає можливість зробити початкові спроби прогнозувати та відповідно реагувати на можливі наслідки зміни клімату за допомогою сигналів від компонентів екосистеми, таких як мезо- та вищих хижаків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 How many oceans are there?/ NOAA's National Ocean Service. – Режим доступу: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/howmanyoceans.html>. – 19.12.2017. – Назва екрану
- 2 Position Analysis: Managing change in Southern Ocean Ecosystems / Constable A.J. [et al.]. – Hobart: The Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, 2017. – 39 p.
- 3 Agnew D.J. The CCAMLR Ecosystem Monitoring Programme / D.J. Agnew // Journal of Antarctic Science. – 1997. – Vol. 3(9). – P. 235-242
- 4 Andrew J. C. Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR) / J. C. Andrew, I. Everson, D. Miller [et al.] // Journal of Marine Science. – 2000. – Vol. 57(3). – P. 778–791
- 5 Reid K. Antarctic ecosystem monitoring: quantifying the response of ecosystem indicators to variability in Antarctic krill / K. Reid, J.P. Croxall, D.R. Briggs, E.J. Murphy // Journal of Marine Science. – 2005. – Vol. 62. – P. 366-373
- 6 Thomas J. B. Predicting Antarctic Climate Using Climate Models / J. B. Thomas, E. B. Nicholas, K. Kusahara, I. Wainer // Antarctic Environments Portal. – Режим доступу: <https://www.environments.aq/information-summaries/predicting-antarctic-climate-using-climate-models/>. – 15.12.2017. – Назва екрану
- 7 Andrew J. C. Climate change and Southern Ocean ecosystems I: how changes in physical habitats directly affect marine biota / A.J. Constable, J. Melbourne-Thomas, S.P. Corney, K.R. Arrigo, C. Barbraud, D.K.A. Barnes [et al.] // Global Change Biology Journal. – 2014. – Vol. 20(10). – P. 3004-3025
- 8 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Research Report: Part A/ Global and Sectoral Aspects. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / C.B. Field,

- V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi [et al.]. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 1132 p.
- 9 Convey P. Antarctic Climate Change and the Environment. Earth Science Faculty Scholarship / P. Convey, J. Turner, R. Bindschadler, G. di Prisco, E. Fahrbach, J. Gutt [et al.] // Antarctic Science Journal. –2009. – Vol. 21(6). – P. 541–563
- 10 Arrigo K.R. Large scale importance of sea ice biology in the Southern Ocean / K.R. Arrigo, D.N. Thomas // Antarctic Science Journal. – 2004. – Vol. 16(4). – P. 471-486
- 11 Montes-Hugo M. Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula / M. Montes-Hugo, S.C. Doney, H.W. Ducklow, W. Fraser, D. Martinson, S.E. Stammerjohn, O. Schofield // Science. – 2009. – Vol. 323(5920). – P. 1470-1473
- 12 Grace K. Saba. Winter and spring controls on the summer food web of the coastal West Antarctic Peninsula / G.K. Saba, W.R. Fraser, V.S Saba, R.A. Jannuzzi, K.E. Coleman, S.C. Doney [et al.] // Nature Communications. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/ncomms5318>. –19.12.2017. – Назва екрану
- 13 Vincent W.F. Microbial ecosystems of Antarctica. XIII / W.F. Vincent. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 304 p.
- 14 Kiko R. Living conditions, abundance and composition of the metazoan fauna in surface and sub-ice layers in pack ice of the western Weddell Sea during late spring / R. Kiko, J. Michels, E. Mizdalski, S.B. Schnack-Schiel, I. Werner // Deep-Sea Research II. – 2008. – Vol. 55. – P. 1000–1014
- 15 Flores H. Impact of climate change on Antarctic krill / H. Flores, A. Atkinson, S. Kawaguchi, B.A. Krafft, G. Milinevsky, S. Nicol [et al.] // Marine Ecology Progress Series. – 2012. – Vol. 458. – P. 1-19
- 16 Parker M. Assemblages of micronectonic fishes and invertebrates in a gradient of regional warming along the Western Antarctic Peninsula / M. Parker, W.R. Fraser, J. Ashford, T. Patarnello, L. Zane, J.J. Torres // Journal of Marine Systems. – 2015. – Vol. 152. – P. 18-41

- 17 Takahashi K. Comparison of zooplankton distribution patterns between four seasons in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean / K. Takahashi, G. Hosie, J.A. Kitchener, D.J. McLeod, T. Odate, M. Fukuchi // *Polar Science*. – 2010. – Vol. 4(2). – P. 317-331
- 18 Clarke A. Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula / A. Clarke, E.J. Murphy, M.P. Meredith, J.C. King, L.S. Peck, D.K.A. Barnes [et al.] // *Phil Trans R Soc Lond B*. – 2007. – Vol. 362. – P. 149–166
- 19 Gutt J. The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses - an integrated circumpolar assessment / J. Gutt, N. Bertler, T.J. Bracegirdle, A. Buschmann, J. Comiso, G. Hosie [et al.] // *Global Change Biology*. – 2015. – Vol. 21(4). – P. 1434-1453
- 20 Peck L.S. Acclimation and thermal tolerance in Antarctic marine ectotherms / L.S. Peck, S.A. Morley, J. Richard, M.S. Clark // *Journal of Experimental Biology*. – 2014. – Vol. 217. – P. 16-22
- 21 Ropert-Coudert Y. A complete breeding failure in an Adélie penguin colony correlates with unusual and extreme environmental events / Y. Ropert-Coudert, A. Kato, X. Meyer, M. Pellé, A.J.J. MacIntosh, F. Angelier [et al.] // *Ecography*. – 2015. – Vol. 38. – P. 111-113
- 22 Jenouvrier S. Projected continent-wide declines of the emperor penguin under climate change / S. Jenouvrier, M. Holland, J. Stroeve, M. Serreze, C. Barbraud, H. Weimerskirch [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2014. – Vol. 4(8). – P. 715-718
- 23 McIntyre T. Elephant seal diving behaviour is influenced by ocean temperature: implications for climate change impacts on an ocean predator / T. McIntyre, I.J. Ansorge, H. Bornemann, J. Plötz, C.A. Tosh, M.N. Bester // *Marine Ecology Progress*. – 2011. – Vol. 441. – P. 257-272
- 24 Beaugrand G. Future vulnerability of marine biodiversity compared with contemporary and past changes / G. Beaugrand, M. Edwards, V. Raybaud, E. Goberville, R.R. Kirby // *Nature Climate Change*. – 2015. – Vol. 5(7). – P. 695–701

- 25 Sahade R. Climate change and glacier retreat drive shifts in an Antarctic benthic ecosystem / R. Sahade, C. Lager, L. Torre, F. Momo, P. Monien, I. Schloss [et al.] // Science Advances. – 2015. – Vol. 1(10). – P. 1-8
- 26 Gutt J. Shifts in Antarctic megabenthic structure after ice-shelf disintegration in the Larsen area east of the Antarctic Peninsula / J. Gutt, M. Cape, W. Dimmler, L. Fillinger, E. Isla, V. Lieb [et al.] // Polar Biology. – 2013. – Vol. 36. – P. 895–906
- 27 Paul K. Dayton. Recruitment, Growth and Mortality of an Antarctic Hexactinellid Sponge, *Anoxycalyx joubini* / K. Dayton Paul, S. Kim, S.C. Jarrell, J.S. Oliver, K. Hammerstrom, J.L. Fisher [et al.] // Journal of PLoS ONE. – Режим доступа: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0056939>. – 19.12.2017. – Назва екрану
- 28 Kennicutt M.C. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond / M.C. Kennicutt, S.L. Chown, J.J. Cassano, D. Liggett, R. Massom L.S. Peck [et al.] // Antarctic Science. – 2014. Vol. 27(1). – P. 3-18
- 29 Hollowed A.B. Are multispecies models an improvement on single-species models for measuring fishing impacts on marine ecosystems? / A.B. Hollowed, N. Bax, R. Beamish, J. Collie, M. Fogart, P. Livingston, J. Pope, J.C. Rice // Journal of Marine Science. – 2000. – Vol. 57(3). – P. 707-719
- 30 Models for an ecosystem approach to fisheries / Eva E. Plaganyi. – Rome: FAO Fisheries Technical Paper, 2007. – No. 477. – 108 p.
- 31 Christensen V. ECOPATH II – a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics / V. Christensen, D. Pauly // Journal of Ecological Modelling. – 1992. – Vol. 61(3–4). – P. 169-185
- 32 Walters C. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments / C. Walters, V. Christensen, D. Pauly // Journal of Reviews in Fish Biology and Fisheries. – 1997. – Vol. 7(2). – P. 139–172
- 33 Pauly D. Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries / D. Pauly, V. D. Christensen, C. Walters // ICES Journal of Marine Science. – 2000. – Vol. 57. – P. 697–706

- 34 Yodzis P. Local trophodynamics and the interaction of marine mammals and fisheries in the Benguela ecosystem / P. Yodzis, J. Anim // Journal of Animal Ecology. – 1998. Vol. 67(4). – P. 635-658
- 35 Mariano Koen-Alonso. Multispecies Modelling of Some Components of the Marine Community of Northern and Central Patagonia, Argentina / K.-A. Mariano, P. Yodzis // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 2005. – Vol. 62(7). – P. 1490-1512
- 36 Simon A. A. Functional coevolutionary networks of the Hsp70–Hop–Hsp90 system revealed through computational analyses / A. A. Simon, S.A. Travers, M.A. Fares // Molecular Biology and Evolution. – 2007. – Vol. 24(4). – P. 1032–1044
- 37 Cury F. Implicit theories and IQ test performance: A sequential mediational analysis / F. Cury, D. Da Fonseca, I. Zahn & A. Elliott // Journal of Experimental Social Psychology. – 2008. – Vol. 44(3). – P. 783-791
- 38 Travers A. Nucleosome positioning - what do we really know? / A. Travers [et al.] // Journal of Mol Biosyst. – 2009. – Vol. 5(12). – P. 1582-1592
- 39 Shin Yunne-Jai. Exploring fish community dynamics through size-dependent trophic interactions using a spatialized individual-based model / Yunne-Jai Shin // Journal of Aquatic Living Resources. – 2001. – Vol. 14(2). – P. 65-80
- 40 The Southern Ocean Observing System (SOOS) // Institute for Marine and Antarctic Studies. – Режим доступа: <http://www.soos.aq>. –15.12.2017. – Назва екрану
- 41 The Southern Ocean Network of Acoustics (SONA) // British Antarctic Survey. – Режим доступа: <https://sona.aq/data/data-access/>. –15.12.2017. – Назва екрану
- 42 Siebren C. Venema. Introduction to Tropical Fish Stock Assessment - Part 1: Manual / C. Venema Siebren, Sparre P. – 2nd ed. – Rome: FIAT PANIS, 1998. – 401 p.
- 43 Hilborn R. Biomass Dynamic Models / R. Hilborn, Carl J. Walters // Journal of Quantitative Fisheries Stock Assessment. – 1992. – P. 297-329
- 44 Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ). Анализ и рекомендации по применению / В.К. Бабаян. – М.: ВНИРО, 2000. – 192 с.

- 45 Report of the Working Group on Nephrops Stocks / ICES. C.M. – ACFM:18. – Galway, 2003. – 629 p.
- 46 Bulgakova T.I. Analysis of Cape horse mackerel and Cape hake fishery in ICSEAF Div.1.3+1.4 based on a mathematical model of two interacting species / T.I. Bulgakova, Z.I. Kizner // Colln.sci.Papers ICSEAF. – 1986. – Vol. 13(1). – P. 119-130
- 47 Christensen V. Ecopath with Ecosim: User's Guide / V. Christensen, C.J. Walters, D. Paul; Fisheries Centre. – Vancouver: University of British Columbia, 2005. – 154 p.
- 48 Walters J. C. Representing Density Dependent Consequences of Life History Strategies in Aquatic Ecosystems: EcoSim II / C. J Walters, D. Pauly, V. Christensen, J.F. Kitchell // Journal of Ecosystems. – 2000. – Vol. 3(1). – P. 70-83
- 49 Fulton E. A. Biogeochemical marine ecosystem models I: IGBEM-a model of marine bay ecosystems / E. A. Fulton, A. D. M. Smith, C. R. Johnson // Journal of Ecological Modelling. – 2004. – Vol. 174(3). – P. 267-307
- 50 Atlantis model development for the Northern Gulf of California: NOAA Technical Memorandum NMFS-NWFSC-110 / C.H. Ainsworth, I.C. Kaplan, P.S. Levin, R. Cudney-Bueno, E.A. Fulton, M. Mangel, P. Turk-Boyer, J. Torre, A. Pares-Sierra, H.N. Morzaria Luna; U.S. Department of Commerce. – 2011. – 293 p.
- 51 Fulton E. A. Biogeochemical marine ecosystem models II: the effect of physiological detail on model performance / E. A. Fulton, J.S. Parslow, A.D.M. Smith, C.R. Johnson // Journal of Ecological Modelling. – 2004. – Vol. 173(4). – P. 371-406
- 52 Rockström J. A safe operating space for humanity / J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. Chapin, E. F. Lambin [et al.] // Journal of Nature. – 2009. – Vol. 461. – P. 472-475
- 53 Steffen W. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet / W. Steffen, K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett [et al.] // Journal of Science. – 2015. – Vol. 347(6223). – P. 2-61

- 54 IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley, et al.]. – NY, 2013. – 1535 p.
- 55 Orr James C. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms / James C. Orr, V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely [et al.] // *Journal of Nature*. – 2005. – Vol. 437(7059). – P. 681–686
- 56 Costello M. J. Can we name Earth's species before they go extinct? / M. J. Costello, R. M. May, N. E. Storck // *Journal of Science*. – 2013. – Vol. 339 (6118). – P. 413-416
- 57 Hernando M. P. Effects of salinity changes on coastal Antarctic phytoplankton physiology and assemblage composition / M. Hernando, I.R. Schloss, G. Malanga, G.O. Almandoz, G.A. Ferreyra, M.B. Aguiar, S. Puntarulo // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. – 2015. – Vol. 466. – P. 110–119
- 58 Golledge N. The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise / N. Golledge, D. Kowalewski, T. Naish, R. Levy, C. Fogwill, E. Gasson // *Journal of Nature*. – 2015. – Vol. 526(7573). – P. 421-425
- 59 Pasotti F. Antarctic shallow water benthos in an area of recent rapid glacier retreat / F. Pasotti, E. Manini, D. Giovannelli, A. C. Wöfl, D. Monien, E. Verleyen [et al.] // *Journal of Marine Ecology*. – 2015. – Vol. 36(3). – P. 716–733
- 60 Brandt A. Challenges of Southern Ocean deep-sea biodiversity assessments / A. Brandt, H. Griffiths, J. Gutt, K. Linse, S. Schiaparelli, T. Ballerini [et al.] // *Advances in Polar Science*. – 2014. – Vol. 25(3). – P. 204-212
- 61 Biogeographic Atlas of the Southern Ocean: PART 5. Chap.5.29 - Southern Ocean benthic deep-sea biodiversity and biogeography / A. Brandt, A. P. van de Putte, H. Griffiths. – Cambridge: Cambridge Scientific Committee on Antarctic Research, 2014. – 477 p.
- 62 Xavier J. C. Cephalopod Beak Guide for the Southern Ocean / J. C. Xavier, Y. Cherel. – Cambridge: British Antarctic Survey, 2009. – 129 p.

- 63 Brandt A. The Southern Ocean deep sea: first insights into biodiversity and geography / A. Brandt, A. J. Gooday, S. B. Brix, W. Brökeland, T. Cedhagen, M. Choudhury [et al.] // *Journal of Nature*. – 2007. – Vol. 447. – P. 307–331
- 64 Brandt A. Southern Ocean deep benthic biodiversity / A. Brandt, C. De Broyer, B. Ebbe, K. E. Ellingsen, A. J. Gooday, D. Janussen [et al.] // *Antarctic Ecosystems: An Extreme Environment in a Changing World*. – Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2012. – P. 291–334
- 65 Brandt A. Southern Ocean biodiversity – from pelagic processes to deep-sea response / A. Brandt, B. Ebbe // *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*. – 2011. – Vol. 58(19). – P. 1945–1947
- 66 Danovaro R. Challenging the paradigms of deep-sea ecology / R. Danovaro, P. V. R. Snelgrove, P. Tyler // *Trends Ecol. Evol.* – 2014. – 29 (8). – P. 465–475
- 67 Murphy E. J. End-to-end in southern ocean ecosystems / E. J. Murphy, E. E. Hofmann // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. – 2013. – Vol. 4(3). – P. 264–271
- 68 Xavier J. C. From ice to penguins: the role of mathematics in Antarctic research / J. C. Xavier, S. L. Hill, M. Belchier, T. J. Bracegirdle, E. J. Murphy, J. Lopes-Dias // *Mathematics of Energy and Climate Change: International Conference and Advanced School Planet Earth*. – Portugal: Springer International Publishing Switzerland, 2015. – P. 389–414
- 69 Gille S. T. Warming of the Southern Ocean since the 1950s / S. T. Gille // *Journal of Science*. – 2002. – Vol. 295. – P. 1275–1277
- 70 Sallée J.-B. Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the Southern Annular Mode / J.-B. Sallée, K. G. Speer, S. R. Rintoul // *Nature Geoscience*. – 2010. – Vol. 3. – P. 273–279
- 71 Tagliabue A. Surface-water iron supplies in the Southern Ocean sustained by deep winter mixing / A. Tagliabue, J.-B. Sallée, A. R. Bowie, M. Lévy, S. Swart, P. W. Boyd // *Nature Geoscience*. – 2014. – Vol. 7. – P. 314–320
- 72 Heuzé C. Can we map the interannual variability of the whole upper Southern Ocean with the current database of hydrographic observations? / C. Heuzé, F. Vivier,

- J. Le Sommer, J. M. Molines, T. Penduff // *J. Geophys. Res.* – 2015. – Vol. 120(12).
– P. 7960-7978
- 73 Sarmiento J. Ocean carbon cycle response to future greenhouse warming /
J. Sarmiento, T. Hughes, R. Stouffer, S. Manabe // *Journal of Nature.* – 1998.
– Vol. 393. – P. 245–249
- 74 Arrigo K. R. Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and
CO₂ in the southern ocean / K. R. Arrigo, D. H. Robinson, D. L. Worthen,
R. B. Dunbar, G. R. DiTullio, M. VanWoert [et al.] // *Journal of Science.* – 1999.
– Vol. 83. – P. 365–367
- 75 Marine microorganisms and global nutrient cycles / K. R. Arrigo // *Journal of
Nature.* – 2005. – Vol. 437. – P. 349–355
- 76 Hauck J. On the southern ocean CO₂ uptake and the role of the biological carbon
pump in the 21st century / J. Hauck, C. Völker, D. Wolf-Gladrow, C. Laufkötter,
M. Vogt, O. Aumont [et al.] // *Global Biogeochem. Cycles.* – 2015. – Vol. 29(9).
– P. 1451–1470
- 77 Gillett N. P. Simulation of recent southern hemisphere climate change / N. P. Gillett,
D. W. Thompson // *Journal of Science.* – 2003. – Vol. 302. – P. 273–275
- 78 Weimerskirch H. Changes in wind pattern alter albatross distribution and life-history
traits / H. Weimerskirch, M. Louzao, S. De Grissac, K. Delord // *Journal of Science.*
– 2012. – Vol. 335. – P. 211–214
- 79 Siegel D. A. Global assessment of ocean carbon export by combining satellite
observations and food-web models / D. A. Siegel, K. O. Buesseler, S. C. Doney,
S. F. Sailley, M. J. Behrenfeld, P. W. Boyd // *Global Biogeochem. Cycles.* – 2014.
– Vol. 28. – P. 181–196
- 80 Meredith M. P. The vision for a southern ocean observing system / M. P. Meredith,
O. Schofield, L. Newman, E. Urban, M. Sparrow // *Curr. Opin. Environ. Sustain.*
– 2013. – Vol. 5. – P. 306–313
- 81 Meredith M. P. Southern Ocean / M. P. Meredith, M. Mazloff, J.-B. Sallée,
L. Newman, A. Wählin, M. J. M. Williams [et al.] // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*
– 2015. – Vol. 96. – P. 157–160

- 82 Cooke S. J. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology / S. J. Cooke, Scott G. Hinch, Martin Wikelski, Russel D. Andrews, Louise J. Kuchel, Thomas G. Wolcott, Patrick J. Butler [et al.] // *Trends Ecol. Evol.* – 2004. – Vol. 19(6). – P. 334-343
- 83 Ropert-Coudert Y. Trends and perspectives in animal attached remote sensing / Yan Ropert-Coudert, Rory P. Wilson // *Front. Ecol. Environ.* – 2005. – Vol. 3(8). – P. 437-444
- 84 Steinacher M. Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis / M. Steinacher, F. Joos, T. Frolicher, L. Bopp, P. Cadule, V. Cocco [et al.] // *Biogeosciences.* – 2010. – Vol. 7. – P. 979–1005
- 85 Bopp L. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models / L. Bopp, L. Resplandy, J. C. Orr, S. C. Doney, J. P. Dunne, M. Gehlen [et al.] // *Biogeosciences.* – 2013. – Vol. 10. – P. 6225–6245
- 86 Bohmann K. Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring / K. Bohmann, A. Evans, M. T. P. Gilbert, G. R. Carvalho, S. Creer, M. Knapp [et al.] // *Trends Ecol. Evol.* – 2014. – Vol. 29. – P. 358–367
- 87 Zhan A. Rare biosphere exploration using high throughput sequencing: research progress and perspectives / A. Zhan, H. J. MacIsaac // *Conserv. Genet.* – 2015. – Vol. 16. – P. 513–522
- 88 Barnosky A. D. Approaching a state shift in Earth's biosphere / A. D. Barnosky, E. A. Hadly, J. Bascompte, E. L. Berlow, J. H. Brown, M. Fortelius [et al.] // *Journal of Nature.* – 2012. – Vol. 486. – P. 52–58
- 89 CCAMLR-XXXIII: Report of the Thirty-third meeting of the Commission (Hobart, 20-31.10.2014). – Hobart, 2014. – 261 p.
- 90 Roquet F. Estimates of the Southern Ocean general circulation improved by animal-borne instruments / F. Roquet, C. Wunsch, G. Forget, P. Heimbach, C. Guinet, G. Reverdin [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – Vol. 40. – P. 6176–6180