

LAWRENCE M. KRAUSS

A klímaváltozás fizikája

LAWRENCE M. KRAUSS

A klímaváltozás fizikája

FORDÍTOTTA

TORMA PÉTER



TYPOTEX

A könyv megjelenését a kiadói program keretében
a Nemzeti Kulturális Alap támogatta.



Nemzeti
Kulturális
Alap

The Physics of Climate Change

Original English edition Post Hill Press

Copyright © Lawrence M. Krauss, 2022

Hungarian translation © Torma Péter, 2025

Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2025

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta

Vincze Miklós Pál

ISBN 978 963 493 348 9

TARTALOM

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ELŐSZÓ | 9 |
| 1 EGY EGYEDÜLÁLLÓ FOLYÓ | 14 |
| 2 A TÖRTÉNELEM ÉS A SZÁMOK: FÉLIG ÜRES, VAGY FÉLIG TELI? | 21 |
| 3 CIKLUSOK ÉS CIKLUSOK | 34 |
| 4 A FÖLD TAKARÓJA | 45 |
| 5 A KLÍMAVÁLTOZÁS SZÜLETÉSE | 59 |
| 6 A KÉNYSZER EREJE | 72 |
| 7 HISSZÜK, VAGY SEM | 86 |
| 8 VAN, AKI FORRÓN SZERETI | 97 |
| 9 LESZ, AMI LESZ? | 111 |
| 10 A KLÍMAVÁLTOZÁS MA | 134 |
| 11 A LEGROSSZABB ESHETŐSÉG: A VISSZACSATOLÁSOKTÓL AZ ÁTBILLENÉSI PONTOKIG | 144 |
| 12 VISSZA A MEKONGHOZ | 154 |
| EPILOGUS. FELKÉSZÜLTEKÉ A SZERENCSE | 165 |
| | |
| TOVÁBBI INFORMÁCIÓK | 169 |
| ÁBRÁK ÉS FÉNYKÉPEK JEGYZÉKE | 176 |

*Woodynak,
aki rábeszélte, hogy tovább írjak.*

*Nem léphetsz kétszer ugyanabba a folyóba.**
Hérakleitosz

* Szabó Árpád fordítása

ELŐSZÓ

2020 januárjának egyik kora délutánján egyedül üldögéltem egy hajó orrában, amely Phnompenből Ho Si Minh-városba tartott a Mekong folyón. Épp a felkészülést fejeztem be egy előadásra, sütkéreztem a napon, és a folyón nyüzsgő forgalmat figyeltem. Mindenhol bárkák kotorták ki a folyófenék homokját, hogy később különféle célokra használják fel, például a betonba az építkezésekhez. A Mekong Folyó Bizottság adatai szerint a homokbányászat következtében a folyómeder tengerszint feletti magassága 1,4 méterrel csökkent 2008 óta.

Ahogy nézelődtem, egyre jobban hatalmába kerített a bánat és a magány érzése. A bánaté azért, mert a hajó utasainak szánt előadásom, amelyre éppen készülődtem, a klímaváltozás természetéről és fizikájáról szólt – különös tekintettel annak lehetséges hatásaira a Mekong-deltára. Kutatásaim során rájöttem, hogy különböző tényezők összejártsága ezt a hatvanmillió ember otthonául szolgáló régiót – akik közül tizennégymilliónak a sorsa közvetlenül függ a Mekong egészségétől – pusztító vihar epicentrumává tette, ahol a klímaváltozás a következő harminc évben még a visszafogott előrejelzések szerint is le fog rombolni mindent, az itt lakók életével együtt.

Sok útitársam, akik közül néhányan a délután folyamán csatlakoztak hozzám a hajóorrban, még nem volt tisztában a bennünket körülvevő táj törékenységevel, és egyáltalán nem örültem, hogy este ki kell pukkasztanom az őket körülvevő buborékot.

Néhány órával később, az előadásomat követő beszélgetés után világossá vált, hogy bár a valóság egy része kellemetlen, a hajón összegyűlt érdeklődő és jó szándékú laikusok információra vágynak, hogy perspektívába helyezhessék ezt a világméretű egzisztenciális fenyegetést. Tudni akarták, hogyan választhatják szét a búzát az ocsútól, átlátni a kockázatokat, és megérteni, miféle jövőbeli hatásokat okozhat vagy nem okozhat az emberiség. Ekkor határoztam el, hogy megírom ezt a könyvet, és köszönöm az útitársaimnak, hogy inspiráltak erre.

* * *

Nem vagyok klímakutató. Felmerülhet a kérdés, vajon miért gázol bele, szó szerint, ebbe a témába egy részecskefizikus-kozmológus. Azért, mert mások, olyanok, akiknek a jövője kormányok politikájától függ, és akik ki vannak téve a politikusok és a média egymásnak ellentmondó állításainak, szintén nem klímakutatók. Ha nem lehetséges egyenesen és érthetően elmagyarázni a klímaváltozással kapcsolatos tudományos elveket és előrejelzéseket, akkor milyen remény van bármiféle értelmes nyilvános diskurzusra és döntéshozásra a témában?

De hogyan álljunk neki létrehozni valamit, ami aránylag átlátható képet ad az olvasóknak erről a konkrét témáról?

Először is érdemes leszögezni, hogy a klímaváltozás tudománya nem űrtudomány. Miután már írtam könyvet az űrtudományról, vagy legalábbis a képzeletbeli űrtudományról, úgy éreztem, vagyok abban a helyzetben, hogy ezt megíthessem. A tárgy pedig jóval sürgetőbb a huszonharmadik századi űrutazás lehetőségein való agyálásnál, bármennyire izgalmas téma is az utóbbi.

A jövőt előre jelző, szuperszámítógépekkel készített nagyszabású klímamodellek részletei bonyolultak és rémisztők, ám a mögöttük lévő fizika, amely a globális felmelegedést irányítja, annál egyszerűbb, és alapvető természeti törvényekben gyökerezik. Ráadásul a tudományágak történelmi csavarjai és egymás közötti új összefüg-

gései fűszerezik. Azok pedig, akik igazán érdeklődnek iránta, ma már töméntelen mennyiségű adathoz férhetnek hozzá szabadon az interneten.

* * *

Szerencsés vagyok, mivel számos klímaszakértőtől tanulhattam, akik kollégáim és barátaim is egyben. Több mint egy évtizeden át voltam a *Bulletin of the Atomic Scientists* szponzori tanácsának elnöke. Miután 2006-ban tagja lettem a tanácsnak, és létrehoztuk a híres végítélet óráját, úgy döntöttünk, a klímaváltozást is bevesszük az egzisztenciális fenyegetések közé. Minden ősszel szimpóziumot tartottunk, ahol megbeszéltük a tudományos és technológiai kihívásokat, aztán a tudományos és biztonsági tanács, amelynek több klímaszakértő is a tagja volt, tovább tárgyalta azokat a témákat, amelyek a szimpóziumok során merültek fel, amikor eldöntöttük, hová állítsuk be az órát. Később volt szerencsém több tudományos kongresszust és nyilvános eseményt vezetni a klímaváltozás témájában. Legutóbb például az általam vezetett Origins Project alapítvány szervezte hajóutat a Mekongon, ahol az előadásomat tartottam.

Köszönet az ezen évek során folytatott párbeszédéért kollégáimnak, többek közt James Hansennek, Richard Somerville-nek, Susan Solomonnak, Dan Schragnek, Tony Haymetnek, Raymond Pierrehumbertnek és a néhai Wallace Broeckernek, akik közül többen hasznos adatokkal is szolgáltak. Köszönöm nekik intellektuális és emberi nagylelkűségüket.

Számos barát, kolléga és szakértő szintén volt olyan kedves, és létrejöttének különböző szakaszaiban átnézte a könyvet. Mély hálámatt kell kifejeznem különösen Richard Dawkinsnak, Dan Schragnek, Penn Jillette-nek, Richard Somerville-nek, Neil deGrasse Tysonnak, William Fruchtnak, Sheldon Glashow-nak, Keith Ogoreknek és John Dahlnak, amiért kritikus szemmel átolvasták, kommentálták és ezzel jobbá tették a kéziratot. Úgyszintén le vagyok kötelezve annak a sok-sok tudósnak, akik megengedték, hogy a munkájuk során

kiderített adatokat felhasználjam a könyvben. A szövegben maradt hibák természetesen az enyémeek.

Szintén fontos volt a támogatás és a bátorítás, amit ugyancsak sok mindenkitől megkaptam a könyv írása közben. Döbbsenten és kétségbeesetten vettem tudomásul, hogy nem egy kiadó, akit megkerestem, azt jelezte vissza, hogy egy klímaváltozásról szóló könyv csak akkor lehet piacképes, ha az érzelmekre hat, és sötét, elkeseredett hangja csakis az igazhívőkhez szól. Mivel bizonyos értelemben a kiadók a közönség felé igyekvő információ útjában álló kapuőrök, ez megmutatta nekem, mennyire fontos szembeszállni ezzel a felfogással egy olyan könyv esetében, amely valódi információkat közöl annak érdekében, hogy az olvasó megalapozottan dönthessen arról, miként reagál az újságban olvasottakra vagy a politikusoktól hallottakra.

A klímaváltozás mögött lévő tudomány elérhető és érdekes, és ennek kellene lennie a viták és a döntések alapjának. Nem érzelmekre hatással vagy ijesztgetéssel kellene cselekvésre buzdítani, ahogyan nem helyénvaló a tétlenségre bátorítás sem a bizonyítékok és a mögöttük álló tudomány tagadása révén.

Amikor azonban a kiadók mellett barátaimat, kollégáimat és korábbi könyvek rajongóit is megkerestem, visszatért a bátorságom, mert azt láttam, hogy sokaknak éppen ilyen könyvre lenne igényük, és széles körben terjeszteni kellene. Köszönöm mindenkinek, aki megerősített abban a meggyőződésemben, hogy szükség van erre a könyvre, és erőt adtak, hogy igyekezzem eljuttatni mindenkihez, aki hasznosnak találja, akár saját maga számára, akár a másokkal folytatott vitáihoz. Különösen Susan Rabiner, Jahm Najafi, Thomas Houlon, Patty Barnes, Marylee MacDonald, Pamela Paresky és Richard Dawkins segítettek feltárni a kiadás különféle lehetőségeit, és biztosítani, hogy ez a könyv végül a jelen formájában jusson el az olvasókhoz.

Szerencsére e folyamat végén rátaláltam egy nagyszerű kiadóra és szerkesztőre, Adam Bellow-ra. Már az első beszélgetésünkkor nyilvánvalóvá vált, hogy ugyanaz a kép él bennünk a könyvről, és

mindketten hozzá akarunk járulni ahhoz, hogy a tudomány, az érvelés és a szabad, nyitott párbeszéd a társadalom szövetének szerves része maradjon. Nagyon örülök annak, hogy ez a könyv Adamnél és a Post Hill Pressnél talált otthonra.

* * *

A klímaváltozás, az evolúció és az ősrobbanás mind tapasztalati tények, nem pusztán spekulációk, és a vonatkozó adatok igazolják az alapvető elméleti várakozásokat. Ebben az egybevágásban mutatkozik meg legszebben és legerőteljesebben a tudomány. Ebben a könyvben pedig a tudományra fogok koncentrálni. Nem fogok egyes eljárások mellett érvelni; ez a politikusok, lobbicsoportok és politikai mozgalmak hatásköre. Ellenben szemérmetlenül feltárom a ránk váró kihívások súlyosságát, hogy megmutatkozzanak a tételesség kockázatai és lehetséges következményei.

Képmutatás lenne úgy tenni, mintha a munkámnak, bár elsősorban tudományos mű, nem volna emellett politikai szándéka is. Ám ez nem olyan szándék, amelyet egyszerűen liberálisnak, konzervatívnak vagy effélének lehetne besorolni. Így szól: a klímapolitikát végső soron egymással versengő érdekek fogják meghatározni. Nem egyértelmű, hogy ezek tükrözik-e azoknak a széles tömegeknek az érdekeit, akikre a klímaváltozás a legnagyobb hatással lesz. A kormányok, mint mindenben, ebben a kérdésben is inkább követnek valakit, mint hogy az élre álljanak. Az elmúlt évtizedeknek a különösen az utóbbi négy évben* csúcsra járó eseményei igazolták, hogy a demokrácia hatékony működése a választók és a törvényalkotók tájékozottságán áll bukáik.

Nagyrészt a mi döntésünk függvénye, hogy a most előttünk álló lehetséges jövők közül melyiket fogják megélni gyerekeink és unokáink. Nyitott szemmel kell belépniünk ebbe a jövőbe.

* A könyv eredetileg 2021-ben jelent meg, az „utóbbi négy év” tehát az első Trump-kormány hivatali idejét jelenti – *a ford.*

1

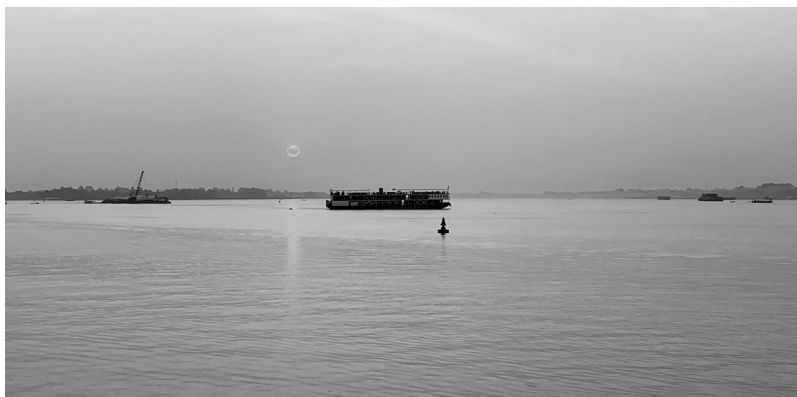
EGY EGYEDÜLÁLLÓ FOLYÓ

Arra gondoltam, milyen csodálatos és milyen különös dolog egy folyó. A folyó az folyó, mindig ugyanott van, ám a benne folyó víz mindig más víz, és mindig mozog. Állandó mozgásban és változásban van. És aztán idővel megváltozik a folyó is.

Aidan Chambers: *This Is All* („Ez minden”)

A Mekong folyón utazni a deltatorokolat közelében egyedülálló vízi út. A nagyrészt hajózhatatlan 4500 kilométeres folyam a legnagyobb Délkelet-Ázsiában, és a tizenkettedik legnagyobb a világon. Mire elhagyja Kambodzsa fővárosát, Phnompent, és Vietnám felé indul, sok-sok ágra szakad a sík terepen. A Mekong vízgyűjtő területe akkora, mint Franciaország és Németország együttvéve. A folyó átlagos szélessége mintegy másfél kilométer, de sok helyütt ennél is jóval szélesebb. A Laosz és Kambodzsa határán található Khone-vízesés a világ legszélesebb vízesése. A zúgók és zuhatagok sora tizenegy kilométer széles, az esése pedig huszonegy méter! Ezenkívül a folyam évente 475 milliárd köbméter vizet zúdít a tengerbe, és hatvanmillió embert lát el élelemmel és vízzel.

A folyó átalakulását a tengerhez vezető út végéhez közeledve gyönyörűen kapja el John Keay mesterien megírt könyve, a *Mad About the Mekong* („A Mekong bolondjai”), amely a 19. század egyik leg-



1. kép. A Mekong folyó torkolata

nagszerűbb és legszívfacsaróbb felfedezőútját követi végig. 1866-ban a húsztágú Francia Mekong Folyó Bizottság kétéves utazásra indult felfelé a folyón, Afrika teljes hosszánál is nagyobb távolságot megtéve, hogy a Mekong teljes rendszerét feltérképezze. Saigonból indultak, és végül sikerült eljutniuk Kínába, a Jangce folyóhoz. Tizenhárman éltek túl az utat.

Keay költői szavakkal írja le a Mekong utolsó nekirugaszkodását a tenger felé:

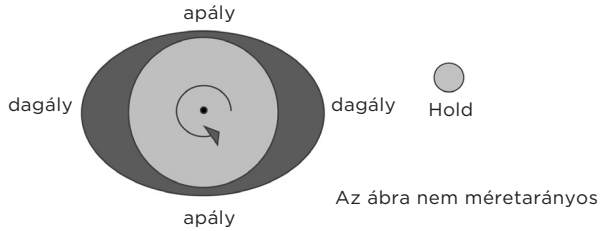
A Mekong útjának utolsó nyolcszáz kilométerén mindössze hat métert ereszkedik, ám az alföld annyira sík, hogy a megáradt folyó tűnik rajta a legnagyobb kiemelkedésnek, amint hogy gyakran az is. Olyan sík a vidék, hogy a felső fedélzeten állva gyakran a Föld felszínének lehajlását is tekintetbe kell venni, ha egy távoli pagoda szintjeit számoljuk [...] Miután több ezer kilométeren völgyzsorosokon és mély erdőségeken verekszi át magát, a folyó itt mintha alig hinné el, micsoda szerencséje van. Mintha felhúzták volna a zsilipjét, szétárad a síkságon, felfedezi a mélyedéseket, meg-megrángatja a dereglyéket, holtágokban sütkérezik, és egyáltalán, igyekszik mindent kihozni első és utolsó akadálytalan kilométereiből. [...] A delta állítólag több rizst termel, mint bármely ha-

sonló nagyságú terület a világon. A tündöklő vízfelszín alatt nem nagy mélységben terülnek el az iszapos mezők. Ám mivel a rizstermesztés tulajdonképpen a hidropónia egy fajtája, az év utolsó hat hónapjában a mezők inkább tavak, és a tájat ellepi a víz.

Bármilyen lírai is ez a leírás, hiányzik belőle néhány a Mekong leg-sajátosabb vonásai közül. Mivel a Mekong-delta alsó, Phnompentől délre eső része alig valamivel fekszik magasabban a tengerszintnél és rendkívül sík, a folyó sekélysege elképesztő változásokat idéz elő az év folyamán. Phnompennél becsatlakozik a folyamba a Tonlé Sap folyó- és tórendszer. A Tonlé Sap folyásiránya az évszaktól és a Mekong szintjétől függően változik. Néha mellékfolyóként beleömlik a Mekongba. Áradáskor azonban megfordul, és az árhullám visszafelé, a hatalmas tóba érkeзве halad végig a Tonlé Sapon.

Az évenkénti áradás és apadás mellett a Mekong naponta is produkál olyasmit, ami, bár nem egyedülálló a világon, elég ritka volt ahhoz, hogy elképesse az első nyugati látogatókat, és minket is megleljen, amikor először hallunk róla. Az év nagy részében ugyanis a deltatorokolatot csupán egyszer önti el a Dél-kínai-tenger dagálya.

Bár a Fox TV egykori műsorvezetője, Bill O'Reilly váltig állította, hogy senki sem tudja, mi okozza a dagályt, valójában nem más, mint sir Isaac Newton magyarázta el az árapály mögött rejlő fizikát, amikor a 17. században kidolgozta az általános tömegvonzás törvényét. Ahogy Newton leírta, a Holdnak a Földre gyakorolt gravitációs ereje fordítottan arányos a Föld és a Hold távolságának négyzetével. Ezért a Hold a Föld hozzá közelebb eső oldalát, amely valamivel közelebb van hozzá, mint a Föld középpontja, nagyobb erővel vonzza, mint amekkorát a Földre átlagosan gyakorol. Hasonlóképpen, a Földnek a Holddal ellentétes oldalát kisebb erő húzza a Hold felé. Egy pillanatra figyelmen kívül hagyva a Hold Föld körüli mozgását, azt várhatnánk, hogy két kidudorodás jelentkezik a világ óceánjain: az egyik a Hold felé néző, a másik az ellentétes oldalon. Durván leegyszerűsítve, az első kidudorodás azért jön létre, mert



1. ábra

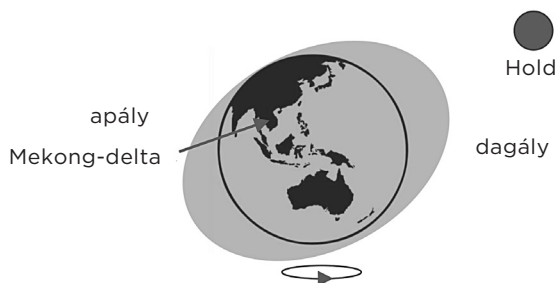
a vizet a gravitáció elfelé húzza a Földtől, a második pedig azért, mert ugyanez az erő a Földet húzza elfelé a víztől. A Föld–Hold-rendszer tehát elvileg úgy néz ki, ahogyan az 1. ábrán szematikusan látható: Mivel a Föld naponta megtesz egy teljes fordulatot, azt várnánk, hogy a bolygó valamennyi pontján mindennap kétszer-kétszer jelentkezik apály és dagály, ahogy azt Newton is leírta.

A gyakorlatban az árapályt ennél sokkal nehezebb megérteni. A Földön lévő víz nem tud azonnal az ábrán látható egyensúlyi helyzetbe rendeződni, mozognia kell egyik helyről a másikra, és ennek a mozgásnak a sebessége függ a helyi viszonyoktól, például az óceán mélységétől. Figyelembe kell venni a Föld forgását és a Hold mozgását, sőt a Nap helyzetét is.

Szerencsénkre nem kell mindezt figyelembe venni, hogy megértjük, hogyan lesz a napi két dagályból napi egy. A kulcs annak felismerése, hogy a Hold nem az Egyenlítő mentén kering a forgó Föld körül. Pályájának síkja a Föld tengelyéhez képest ferde, az eltérés



2. ábra



3. ábra

szöge a Föld egyenlítői síkjához képest 18 és 28 fok között változik egy 18 éves periódus során. Tekintsük a Föld–Hold-rendszert egy olyan vonatkoztatási rendszerben, ahol a Föld forgástengelye függőleges (2. ábra)!

Az ócéánnak a fenti ábrán személtetett gondolatmenetből következő árapályválasza az 3. ábrán látható.

A dagályok abszolút és relatív nagysága a helyi körülmények függvénye. Nagyon leegyszerűsítve, Vietnám földrajzi hosszúságából és a Hold helyzetéből adódóan a környékbeli tengereken erős a dagály akkor, amikor Dél-Vietnám a Föld Hold felé néző oldalán van, majd tizenkét órával később, amikor az ellenkező oldalra kerül, újabb dagály tetőzik.

Nem azért nyüstölöm ennyit ezt a témát, mert futólag az asztrofizikát is érinti, és könnyű vele összezavarni az embert, hanem azért, mert fontos szerepet játszik a Mekong ökoszisztémájának jövőjében, és később még releváns lesz. A napi egyetlen nagy dagály a Mekong folyására is hatással van. Újra Keayt idézem:

A napi egyszeri óriásdagálynak természetesen katasztrofális hatással kellene lennie a deltára. A sós áradásnak, még ha csak napjában egyszer jön is el, tönkre kellene tennie a világ legbősegebb rizsesfazekát, és mangrovebozóttaá kellene változtatnia a harsogó zöld rizstáblákat, ahogy a Dong Nai folyónál is tette Saigon alatt. Ami gátat vet ennek

a katasztrófának, az a Mekong hatalmas ereje. A befelé ömlő dagályhulám találkozik a kifelé ömlő folyóval, és az ökológiai egyensúly legszebb hagyományainak jegyében kibékülnek egymással. A folyó szintje megemelkedik, mert haladását meggátolja a dagály. A folyam napi meghát-rálása Phnompenben, sőt még feljebb is mérhető. Ott és a tengerig tartó három-négyszáz kilométeres szakaszon azonban alig észlelhető, hogy sósabbá válna a víz [...] A folyó ily módon megvédi deltáját leghalálosabb ellenségétől, a megáradó víz ugyanis nem a Dél-kínai-tengeré, hanem a sajátja.

A Mekongban található a világon a legnagyobb fajgazdagságban édesvízi halak, becslések szerint a folyam több mint ezer halfaj élőhelye. A közvetlenül tizennégymillió embert eltartó folyóból évente több édesvízi halat fognak ki, mint az USA összes folyójából és tavából együttvéve. Áradásai az év során vízzel és iszappal táplálják a rizsföldeket, így téve a deltát a világ legbőségebb rizsesfazekává.

Bár a klímaváltozás legsúlyosabb potenciális világméretű hatásainak némelyike talán még évtizedekig, -századokig, sőt -ezredekig sem következik be, a Föld 2.0-ért indított harcnak a Mekong lehet az egyik első áldozata. A folyó sekélysege, a deltatorkolat síksága és a részben az időjárás, részben a folyó dinamikája és az árapály közötti kényes egyensúly okozta áradások különösen érzékennyé tesz a Mekong-deltát a fenti rendszerek bármelyikének bármilyen csekély rövid távú változásaira.

Nem csak a nagy nyilvánosságot kapó borús előrejelzések lehetnek drámai hatással sokak életére. A Mekong-delta valóságos bányakanárija a klímaváltozásnak, ez az egyik oka annak, hogy a leírásával kezdtem ezt a könyvet, és ezért fogok a végén visszatérni a Mekong-térséggel kapcsolatos előrejelzésekre és környezeti hatásokra. De ennél többről is szó van: éppen egyedi jellege, gazdagsága és egy hatalmas népességre gyakorolt hatása miatt a Mekong pusztulásának Délkelet-Ázsia határain messze túlmutató következményei lennének.