

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И
ГЕОГРАФИЯ
ДЕПАРТАМЕНТ ГЕОГРАФИЯ
СЕКЦИЯ ГИС



Петър Йорданов Николов

МОДЕЛИРАНЕ В ГИС СРЕДА НА ЕКОСИСТЕМНАТА
УСЛУГА РЕГУЛИРАНЕ НА НАВОДНЕНИЯ
АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на научна степен
„доктор“, в област на висше образование 4. Природни
науки, математика и информатика, професионално
направление 4.4. Науки за Земята, научна специалност
„Картография и географски информационни системи“

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:
проф. д-р Стоян Недков

гр. СОФИЯ
2024 г.

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И
ГЕОГРАФИЯ
ДЕПАРТАМЕНТ ГЕОГРАФИЯ
СЕКЦИЯ ГИС

Дисертационният труд е обсъден и предложен за публична защита от департамент „География“ при Национален институт по Геофизика, Геодезия и География – БАН на 09.04.2024 г.

Дисертационният труд се състои от заглавна страница, съдържание, списък на съкращенията, увод, четири глави, заключение, списък с използвана литература, списък с фигури и списък с таблици. Общият обем на дисертацията е 139 стр., включително 43 фигури и 33 таблици. Цитираните източници са 127 броя, от които 31 на български и 96 на английски. Използвани са 7 интернет сайта.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на заседание на научното жури на 2024 г. от ч. в Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География, стая 101 в състав:

Външни членове:

Доц. д-р Калина Радева

Доц. д-р Александър Гиков

Доц. д-р Борислав Григоров

Вътрешни членове:

Проф. д-р Стоян Недков

Проф. д-р Марияна Николова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в стая 105 на НИГГТ-БАН и на интернет адрес: <http://www.niggg.bas.bg/>

Съдържание

УВОД	2
Глава 1 ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА	4
1.1 Същност, понятия и класификация	4
1.2 Географски информационни системи и хидроложко моделиране	6
1.3 Екосистемни услуги	8
Глава 2 МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРАНЕ НА ЕКОСИСТЕМНАТА УСЛУГА РЕГУЛИРАНЕ НА НАВОДНЕНИЯ В ГИС СРЕДА 11	
2.1 Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения	14
2.2 Инструмент за оценка в ArcGIS	17
Глава 3 МОДЕЛИРАНЕ НА НИВО ВОДОСБОРЕН БАСЕЙН И ВРЪЗКА С ИНДИКАТОРИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА ЕКОСИСТЕМНАТА УСЛУГА	22
3.1 Калибриране на модела SWAT	22
3.2 Резултати от моделирането на водосборните басейни	25
3.3 Инструмент за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения	26
Глава 4 ОЦЕНКА НА КАПАЦИТЕТА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА НАВОДНЕНИЯ	29
4.1 Оценка на базата на резултати за избрани дни със случаи на наводнения	29
4.2 Оценка на базата на резултати с калибрирани месечни данни	35
4.3 Оценка на базата на резултати за няколко поредни дни с наводнение и отчитане на разликите във валежните количества	39
4.4 Оценка на капацитета за регулиране на наводнения при използване на различни входни данни	44
4.5 Оценка на капацитета за регулиране на наводнения в басейна на река Батулийска	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
Публикации по темата на дисертацията	58
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	58

УВОД

Актуалност на темата

В това изследване се представя методика за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения (*flood control*), която се базира на резултатите от хидроложки модел *Soil & Water Assessment Tool (SWAT)* и по-специално неговата ГИС-базирана версия ArcSWAT. Методът за оценка се осъществява автоматично чрез създаден програмен инструмент, който работи в ГИС среда. Посредством инструмента се оценява състоянието на екосистемите и техния потенциал да предоставят екосистемната услуга за всяка еднородна хидроложка единица (Hydrologic Response Unit(HRU)). Тя представлява комбинация от почвена, растителна покривка и наклон на склон и чрез нея се осъществява пространствена визуализация на оценката на екосистемната услуга регулиране на наводнения за селектирани от потребителя ден, месец и година.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследване са водосборни басейни с ясно изразена опасност от наводнения, които се характеризират с нужда от регулиране за този тип природно бедствие.

Избрани са два водосборни басейна, които служат като тестови райони за прилагане на разработената методика. За водещ водосбор е избран този на горното течение на р. Огоста, поради добрия набор от налични данни, нужни за работа с хидроложкия модел ArcSWAT. Като втори водосбор е избран този на р. Батулийска, тъй като районът е добре познат и е вече изследван като част от по голяма територия.

Предмет на изследване са ГИС базираните средства за оценка и картографиране на капацитета на екосистемите на ниво

водосборен басейн, които да осигуряват екосистемната услуга регулиране на наводнения.

Цел и задачи на изследването

Основната цел на настоящото изследване е да се развие методиката за оценка и картографиране на екосистемната услуга регулиране на наводнения чрез използване на подходящи хидроложки модели, работещи в ГИС среда и усъвършенстване на алгоритмите за оценка и приложимостта ѝ при използване на различни входни данни.

За изпълнение на целта са поставени следните задачи:

1. Изясняване на теоретичната база – преглед на вече разработени методи за качествена оценка на екосистемните услуги, преглед на материали, свързани с хидроложки моделирания и програмиране;
2. Разработване на методически подход за оценка и картографиране на услугата регулиране на наводнения;
3. Избор на основна тестова територия – зависи строго от наличните данни, нужни за изследването;
4. Хидроложко моделиране – задачата включва самия избор на подходящ модел за хидроложко моделиране, неговото извършване и анализиране на резултатите;
5. Разработване на инструмент в ГИС среда посредством програмен код – задачата засяга същинската част на изследването. След избора на район на изследване от страна на потребителя и хидроложкото моделиране трябва да бъде създаден инструмент, който да извлича резултатите от ArcSWAT и да приложи методиката за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения;
6. Оценка и картографиране на екосистемната услуга регулиране на наводнения за основния тестови район;
7. Приложение на разработения подход за тестови райони с ограничен набор от данни.

Глава 1 ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

1.1 Същност, понятия и класификация

Наводнение се случва, когато територии биват залети при покачване на речното ниво, вследствие на валежи (най-вече интензивни), снеготопене или скъсване на диги, язовирни стени и др. (Николова и Недков, 2012). В зависимост от множеството фактори, които могат да предизвикат наводнения, съществуват различни определения за тях, в зависимост от причините, средата и времето, в които се проявява явлението. Според класификацията и типологията на хидроложките бедствия в базите данни на EM-DAT и Munich-Re, наводнение наричаме значителното покачване на нивото на водата в реки, езера, язовири или крайбрежни зони. То е естествен и периодично повтарящ се природен процес (Below et al, 2009). Според „Предварителна оценка на риска от наводнения в главните речни басейни на Република България – методика за оценка на риска от наводнения, съгласно изискванията на директива 60/2007/ЕС“ (2011), „наводнение“ е „временното покриване с вода на земен участък, който обичайно не е покрит с вода“.

Рискът от наводнение е функция на честотата (вероятността), с която се проявяват наводненията, експонираността и възможните щети, които могат да бъдат нанесени в засегнатите територии. Вероятността от наводнение се дефинира обикновено като честотата, с която ежегодно се наблюдава явлението или над зададено ниво на интензивност (Николова и Недков, 2012). Щетите от наводненията зависят от количеството на водата, нейната скорост (т. нар. параметри на опасността) и уязвимостта на населените места (хората, инфраструктурата) и екосистемите.

Наводненията се проявяват най-често при заливните тераси на реките. Те са най-застрашените територии от това природно бедствие, особено когато са стопански усвоени (Morrison et al, 2024; Evans et al, 2004; Hall et al, 2005; Mokrech et al, 2008). Поради това се използва и моделиране при промените в земното покритие и земеползването в рамките на речни басейни, за да бъде анализиран потенциалния риск от наводнения. Като заключение се посочва, че урбанизирането на речните тераси води до нарастване на опасността от наводнения (Barredo and Engelen, 2010; Jongman, 2015). Наводнени е се случва, когато се надвишава абсорбиционният капацитет на речните легла и на почвите, а това довежда до повишаване нивото на речните води и заливане на околната територия. Поради тези причини именно върху заливните тераси и влажните зони е съсредоточено управлението на риска от наводнения (Николова и Недков, 2012).

Наводненията в речните басейни могат да бъдат предизвикани от редица причини: излизане на речните води от коритото на реката (флувиални); преграждане на речното корито (свлечени земни маси, затлачени с наноси или непочистени речни корита); повишаване на нивото на подпочвените води (плувиални); повишаване на нивото на водата вследствие на интензивно снеготопене (нивални); предизвикано от разрушаване на хидротехнически съоръжения (техногенни) (Николова и Недков, 2012).

Според времето, за което се формират: внезапни (локални, flash flood) и продължителни (обща, general flood) (Below et al. 2009). Според U.S. National Weather Service в зависимост от щетите, честотата и обхвата на наводненията разграничаваме още следните видове: малки, големи, много големи, опустошителни и катастрофални.

1.2 Географски информационни системи и хидроложко моделиране

Географската информационна система (ГИС) представлява вид информационна система, предназначена за въвеждане, съхраняване, обработване, анализиране и извличане на географски (геопространствени) данни с цел решаването на разнообразни задачи в най-различни области – управление на околната среда, транспорт, демография, публична администрация, бизнес и др. (Попов, 2011). В структурно отношение ГИС е изградена от следните компоненти: компютърна система, географски данни, потребители.

Моделирането в ГИС среда може да бъде дефинирано в контекста на географските информационни системи (ГИС) като операции на софтуера, които симулират процеси от реалния свят. Моделите се използват в широк набор от ГИС приложения – от прости изчисления до предвиждане на бъдещото състояние на ландшафта. ГИС може да се свърже с други специализирани модели, което улеснява работата на потребителя. Такива модели например могат да симулират климатични или хидроложки явления като ArcSWAT или KINEROS.

Хидроложкото моделиране е опростена симулация на реалните процеси, засягащи водния цикъл или движението на водата в рамките на водосбора, като повърхностен отток, инфилтрация в почвата, ерозия, твърд отток, потоците от хранителни вещества, движението на химически елементи и др. (Singh, 1995).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) е хидроложки модел, работещ на ниво водосборен басейн, разработен с цел да се предвижда въздействието на видовете земеползване върху елементите на водния кръговрат в относително големи

комплексни басейни, с разнообразни на видове почви, земно покритие и релеф (Arnold et al, 2012).

SWAT и неговата ГИС версия ArcSWAT са едни от най-използваните хидроложки модели в световен мащаб за решаване на проблеми, свързани с водосборни басейни и тяхното управление. Това е така, защото имат възможността да предвиждат въздействието на почвите, земното покритие и управленските практики върху движението на водните потоци и тяхното качествено измерение. От друга страна, съществуват редица материали под формата на помагала, научни статии и видео презентации, достъпни до потребителя и описващи процесите, чрез които моделът функционира. Това го прави достъпен и за потребители, които нямат специализирано обучение. Последното може да е наложително при по-задълбочен хидроложки анализ, който не е част от това изследване. SWAT дава конкретни резултати при дадени входни данни и разделя изследваната територия на отделни части – суббасейни, за да може да разгледа техните взаимоотношения в рамките на разглеждания водосбор. „Проектиран е с цел оценка и предвиждане на последствията от въздействието на човешката дейност върху водите за сравнително големи басейни и разнообразна ландшафтна структура за относително дълъг период от време (Arnold et al. 1994).“ SWAT има възможност да използва денонощни/средно-денонощни, месечни и годишни климатични данни. Използвайки дадената пространствена информация – локация, релеф, почвена и земна покривка, създава количествени данни за определени параметри като твърд отток, повърхностен отток, инфилтрация, евапотранспирация и др. (Николова и Недков, 2012).

На базата на характера на извършваните операции, необходимите данни за входа и получените резултати на изхода,

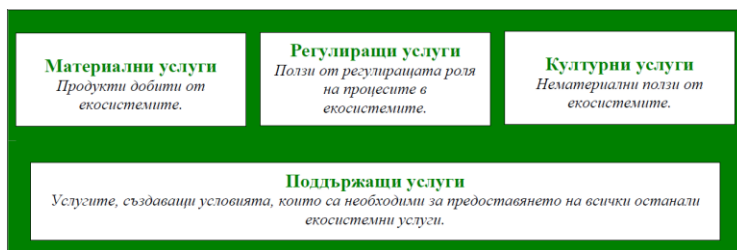
структурата на модела може да се раздели на три модула: пространствен, биофизичен и климатичен. В първият модул се определят границите на речния басейн и прилежащите му суббасейни на базата на цифров модел на релефа, както и създаване на речна мрежа. Във вторият модул се обработва информацията за почвено, земно покритие и наклон на склон, а в третият се анализират климатичните данни.

1.3 Екосистемни услуги

Много от човешките блага съществуват благодарение на екосистемите. Такива блага са чистия въздух, питейната вода, плодородието на почвата, благоприятния климат. В научната литература те се обозначават с термина „екосистемни услуги“.

Стандарт за изпълнение (СИ) на Международната финансова корпорация (МФК) определя екосистемните услуги като „ползите, които хората, включително и бизнеса, извличат от екосистемите“, което съвпада с определението, дадено в „Екосистемната оценка на хилядолетието“, което се изразява във формирането на глобална оценка на антропогенното въздействие върху околната среда – “the benefits people obtain from ecosystems”.

Въпреки че няма единна система за категоризация на екосистемните услуги, рамката на Millennium Ecosystem Assessment – МА е общоприета и представлява полезна отправна точка. МА посочва четири основни категории екосистемни услуги: материални, регулиращи, културни и поддържащи. Техните типове са комплексни и взаимосвързани (Фиг. 1.1).



Фиг 1.1 – Типология на екосистемните услуги (по Зервудакис, 2007).

Регулационни услуги – ползите, които хората получават от регулирането на екосистемните процеси. Наред с другите ползи те включват регулиране на местния климат, съхранение и улавяне на въглерод; смекчаване на природните рискове; пречистване на водата и въздуха; контрол на вредителите и болестите; опрашване.

Контрол или регулиране на наводнения е регулационна екосистемна услуга, която може да редуцира негативните ефекти от най-честото природно бедствие в Европа, причиняващо многобройни щети и икономически загуби (Николова и Недков, 2012; Boyd, Banzhaf, 2007). Екосистемната услуга е насочена към капацитета на екосистемите да предотвратят или редуцират опасността от наводнения. Елементите на ландшафта са ключови за изпълнението на задачата, а за помощни средства все по-често се използват вече описаните хидроложки и хидравлични модели, както и географски информационни системи. Така ползите на социума от услугата се свеждат до опазване на инфраструктурата, човешкия живот и намаляване на щетите (Fisher et al., 2009).

Доставянето на екосистемната услуга регулиране на наводнения зависи от пространствените характеристики. Например горите доставят естествена превантивна мярка,

намалявайки щетите върху инфраструктурата и влияейки върху капацитета на задържане на водата (de Groot et al., 2010). По този начин те подпомагат и други мерки за защита като корекции и диги. Обикновено се подчертава значението на влажните зони, заливните тераси и като цяло бреговите екосистеми, но трябва да се обръща внимание и на останалите екосистеми в рамките на речния басейн, които влияят на водния баланс. Влиянието на водния баланс се осъществява чрез интерцепция (която зависи от земното покритие и земеползването) и инфилтрация (която зависи от почвената покривка). Освен това влияние оказват и абиотични фактори като релеф, наклон на склон и геоложка основа. От тук може да се направи заключението, че това са и основни данни, които могат да се използват за картиране и оценка на услугата чрез ГИС и моделиране.

Това показва, че оценката на екосистемната услуга регулиране на наводнения трябва да бъде биофизична и да се свързва с определени територии. (Nedkov and Burkhard, 2012).

Глава 2 МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРАНЕ НА ЕКОСИСТЕМНАТА УСЛУГА РЕГУЛИРАНЕ НА НАВОДНЕНИЯ В ГИС СРЕДА

За изпълнението на целта на това изследване за доразвиване на методиката за оценка и картографиране на екосистемната услуга регулиране на наводнения в ГИС среда е разработен подход, който може да се обобщи в шест стъпки, които са описани детайлно в следващите точки на тази глава (Фиг. 2.1).



Фиг. 2.1 – Схема на методически подход за оценка и картографиране на екосистемната услуга регулиране на наводнения

Първата стъпка в методиката е избор на тестови район. Избраните тестови райони са Горният басейн на р. Огоста и басейнът на р. Батулия. За първия район са налични детайлни данни, което е и основна причина за неговия избор, а за втория са използвани широко достъпни данни. Вторият район е избран поради това, че вече сме разработвали изследвания на ниво дипломна работа по него и ни е добре познат, а и е подходящ за целите на дисертационния труд.

Втората стъпка включва обработката на входните данни така, че да могат да бъдат ползвани за хидроложкото моделиране с ArcSWAT. Извършва се рекласификация на земното покритие от CLC към LULC. Извършва се допълнителна обработка на почвеното покритие по FAO.

Третата стъпка включва хидроложко моделиране на тестовата територия. При работа с ArcSWAT следват няколко етапа на работа:

Определяне границите на басейни и суббасейни: първата стъпка при зареждане на модела е определянето на границите на изследването и създаване на речната мрежа, върху която се гради и резултатния хидроложки анализ. Резултатите от обработката на цифровия модел на релефа, биват подложени на вторична такава, чрез която територията се разделя на т.н. суббасейни. За изследваната територия от басейна на река Огоста моделът създава общо 25 суббасейна с прилежащите им характеристики като площ, средна надморска височина, най-висока и най-ниска точка и уникален идентификатор.

Определяне на Hydrologic Response Units – HRU: HRU или **еднородни хидроложки единици** са най-малките пространствени единици в модела ArcSWAT. Те са комбинация от наклон на склон, земно покритие, почвено покритие и географското положение, в зависимост от това в кой суббасейн

се намират. Те са изключително важни в рамките на това изследване, което е базирано на характеристиките им от резултатите на модела.

Въвеждане на хидроклиматични данни: за хранването на модела ArcSWAT са нужни редица хидроклиматични данни като: количество валежи (дневни или месечни), относителна влажност, средна температура на въздуха, скорост на вятъра, слънчева радиация и данни, нужни за калибрирането на резултатите от модела – количество речен отток. Тези данни са генерирани/симулирани от самия модел като използва Weather Generation Database (WGEN). За целта на това изследване като реални или негенерирани данни от модела се използват дневното количество отток, измерено от хидрометрична станция Гаврил Геново за периода 2000 – 2005г. Тези данни са нужни за калибрацията на резултата от хидроложкото моделиране.

Същинско моделиране: след извършването на гореописаните операции потребителят избира желанието от него период, като задължително трябва да бъде посочен форматът на желаните резултати – дневен, месечен или годишен. За да бъде възможно генерирането на какъвто и да е резултат, е нужно задаване на т.н. подготвителен период или warmup period, чрез който моделът анализира данни от предишни години и на тяхна база симулира движението на водните потоци за следващите години. За задоволителни резултати такъв период трябва да има продължителност от поне 2г. Периодът избран тук са годините между 2000 и 2003 г. вкл. На тяхната база в рамките на това изследване биват генерирани дневни резултатите за 2004г., след което потребителят има възможност да ги запише в геобаза данни.

Четвъртата стъпка включва калибрирането на резултатните данни от хидроложкият модел ArcSWAT. Резултатите са калибрирани чрез свободния софтуер SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs). Софтуерът извършва автоматично калибриране и е създаден специално за обработка на резултатите на модела SWAT. Процесът е описан в Глава 3.

Петата стъпка е използването на вече споменатият ArcGIS инструмент. Инструментът има лесен за боравене диалогов прозорец, чрез който се посочва местоположението на първичните данни, желаната локация за записване на крайните резултати в база данни и посочване на времевия аспект на данните. Тази стъпка се извършва автоматично и поетапно от разработения инструмент. Инструментът взима данни само за определени индикатори и създава оценка на техния капацитет, а на базата на тях създава и самата оценка за екосистемната услуга регулиране на наводнения.

Шестата стъпка включва визуализация на резултатите. Тя се извършва чрез проста операция, чрез която крайните таблични резултати се свързват с първичните геометрични данни.

2.1 Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения

Биофизичните методи на оценка на екосистемните услуги, представени и обобщени от Vihervaara et al. (2017), използват т.н. биофизични единици, изразяващи количествени показатели (като например количество абсорбирана вода, площ на гора или количество карбон в почвата на определена площ). Например нуждата от предоставяне на услугата „пречистване на водата“ може да бъде измерена с количеството замърсители на кубичен метър, т.е. чрез задържане или абсорбация на замърсители

(Geneletti, 2013). Това означава, че биофизичната методика се фокусира върху измерването на екосистемните процеси, функции и потока от екосистемите. Чрез тях могат да бъдат оценени освен крайната продукция на екосистемните услуги, така и благосъстоянието, за което те допринасят. Тези биофизични единици могат да бъдат наречени още параметри, а параметрите се представят чрез т.н. индикатори. Индикаторите служат за мониторинг на състоянието и промените на екосистемите, но и за оценка или остойността на екосистемните услуги.

В рамките на това изследване са избрани три индикатора за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения: същинска евапотранспирация (actual evapotranspiration), повърхностен отток (surface runoff) и сумарен отток (water yield). Параметрите на индикаторите са генерирани от хидроложкия модел ArcSWAT и са извлечени от резултатната геобаза данни.

Същинската евапотранспирация (actual evapotranspiration) в ArcSWAT представлява количеството изпарени валежи, прекъснато от растителността. След това се изчисляват стойностите на същинската сублимация и евапотранспирация от почвите. Важно е да се отбележи, че изчислението на евапотранспирацията от почвите се отчита само когато няма наличие на снежна покривка. Ниските количествени стойности на евапотранспирацията са индикатор за нисък капацитет на екосистемите да регулират наводнения.

Повърхностният отток (surface runoff) е оттокът, който не преминава в почвата. Използвайки дневните количествени стойности на валежите, ArcSWAT симулира повърхностния отток за всяка еднородна хидроложка единица (HRU). Високите стойности на повърхностния отток са индикатор, че екосистемата задържа по-малко вода в структурата си и съответно капацитетът на екосистемата да регулира наводнения е нисък.

Сумарният отток (water yield) е нетното количество вода, което напуска еднородната хидроложка единица (HRU) и попада в речния поток. Висока стойност на сумарния отток е индикатор за нисък капацитет на екосистемата да регулира наводнения.

Биофизичните методи за оценка на екосистемните услуги се базират на количествената оценка на различни параметри от биотични или абиотични структури и се разделят на три главни групи в зависимост от мерната единица и начина на извличане на нужната информация (Vihervaara et al., 2018). Те са директни измервания, индиректни измервания и моделиране. В рамките на това изследване е приложен един метод от третата група, а именно използване на хидроложкия модел ArcSWAT за генериране на параметрите, нужни за оценката на екосистемната услуга. Параметърът на индикатора същинска евапотранспирация е количество изпарена вода за ден (mm H₂O/day), за индикатора повърхностен отток е количеството на оттока, непреминаващ в почвата за ден (mm H₂O/day), а за сумарния отток е количеството вода, напускаща еднородната хидроложка единица (HRU) – отново(mm H₂O/day). При по-мощни изследвания като например басейна на р. Дунав за основа е възможно да служат суббасейните вместо еднородни хидроложки единици (Karabulut et al., 2016).

Количествените стойности се използват за генериране на качествени оценки по скалата от 1 до 5 (подобно на Burkhard et al., 2009, където скалата започва от 0) на принципа на равния интервал. За горния басейн на Огоста е извършена и експертна оценка по скалата от 0 до 5. По този начин при оценяването на индикаторите, а в последствие и на екосистемната услуга регулиране на наводнения, може да бъде приложена на всяка една територия/речен басейн.

Самите оценки са разграничени както следва: 0 – няма капацитет, 1 много нисък капацитет за регулиране на наводнения, 2 нисък, 3 среден, 4 висок и 5 много висок. Средноаритметичният резултат от оценките на трите индикатора създава оценката на екосистемната услуга регулиране на наводнения. Като се използва тази скала, резултатите могат да бъдат лесно четими и също така лесно да се визуализират. Самата визуализация се извършва чрез привързването на оценките, базирани на резултатите от ArcSWAT, към еднородните хидроложки единици HRU, представени като площни обекти в процеса на работа с хидроложкия модел

2.2 Инструмент за оценка в ArcGIS

Изпълнението на самата методика по качествена оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения се извършва посредством създаден специално за тази цел автоматичен инструмент. За програмен език е избран Python. Главната причина за този избор е, че той е основата на една от най-изполваните ГИС платформи в глобален мащаб – ArcGIS, а освен това той има отделна библиотека за изпълняване на команди и създаване на инструменти от потребителя в ГИС среда – ArcPy. ArcPy е библиотека за манипулация на модели на данни в ГИС (прекъснати и непрекъснати), а те са основните източници на информация в рамките на изследването. Тези фактори улесняват изследването, тъй като резултатният инструмент може да бъде включен във вече големия набор от подобни в ArcGIS. За решаване на задачите и най-вече постигане целта на изследването инструментът трябва да изпълнява няколко функции, за да предостави възможно най-разбираем резултат (Фиг. 2.11). Такива функции са:

Търсене и намиране на така наречените първични резултати от изследването – геобазата данни на ArcSWAT;

Създаване на нова геобаза данни, в която да се съхраняват същинските резултати от изследването – качествените оценки на индикаторите и оценката на самата екосистемна услуга регулиране на наводнения;

Избор на дата – в зависимост от времевата рамка на използваните данни потребителят трябва да извлече информация само за датата, която засяга неговото изследване. То може да засяга определен ден от определена година, когато е имало екстремни валежи. Затова инструментът трябва да предоставя възможността да генерира данни само за желаната от потребителя дата.

Генерализиране на първичните резултати – тази функция включва извличането на желаните параметри като се игнорира останалата информация от първичните резултати и записването им във вече създадената нова геобаза данни;

Оценка на индикаторите – тази функция включва анализиране на количествените параметри на избраните индикатори. За всеки един от тях инструментът трябва да извлече максималните и минималните стойности и да създаде равномерна скала, по която да извърши качественото оценяване. По този начин инструментът лесно ще може да има модел за оценка или шаблон, който да бъде прилаган за различни територии.

Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения – последната стъпка, в която инструментът се базира на оценките на индикаторите и създава цялостна оценка за капацитета на екосистемната услуга регулиране на наводнения, засягаща определената еднородна хидроложка единица (HRU).



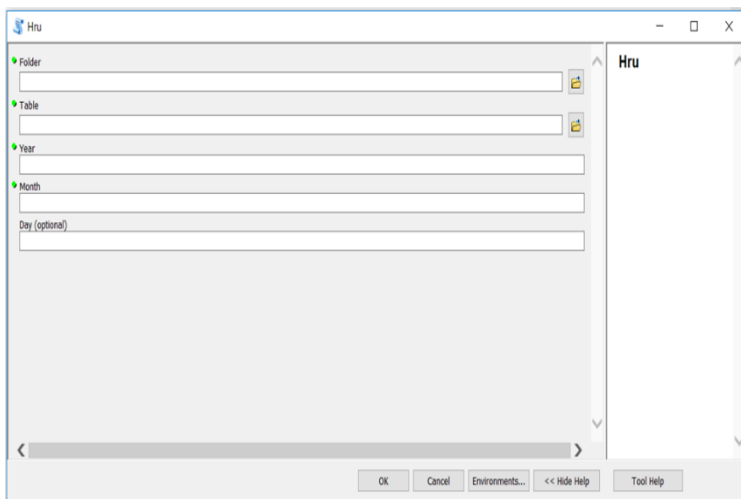
Фиг. 2.11 – Структура на разработения ГИС инструмент.

Преди всичко подобен инструмент трябва да бъде лесно достъпен, разбираем и създаден по такъв начин, че да може да бъде използван от всеки потребител, т.е. user friendly. Затова и параметрите от диалоговия му прозорец представят ясно неговите функции:

Въвеждане на желания адрес или локация на бъдещата новосъздадена база данни, която ще съхранява същинските резултати от инструмента (Фиг. 2.12, поле Folder);

Посочване на адреса/локацията в харддиска на геобазата данни на първичните резултати от ArcSWAT (Фиг. 2.12, поле Table);

Избиране на желаните от потребителя ден, месец и година (Фиг. 2.12, полета Year, Month, Day).



Фиг. 2.12 – Диалогов прозорец на инструмента за оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения

Очакваните резултати от инструмента е геобазаданни, която да съхранява извлечената и оценената информация под формата на таблица, която да може да се свърже с пространствените обекти/еднородните хидроложки единици (**HRU**). По този начин качествените оценки на екосистемната услуга регулиране на наводнения придобиват и пространствен характер, а резултатите могат да бъдат визуализирани и картографирани (Табл. 2.10).

Номер на реда, репрезентиращ еднородната хидроложка единица (HRU)	No
Данни за земното покритие	LULC
Данни за почвите	SOILS
Данни за наклона на склона	SLOPE
Наименование на еднородната хидроложка единица	HRU
Код за релация с геопространствения файл – полигонен ESRI shape файл	HRUGIS
Номера на суббасейна, в който се намира еднородната хидроложка единица (HRU)	SUB
Избраният от потребителя месец	MON
Избраният от потребителя ден	DAY
Избраната потребителя година	YEAR
Площ на еднородната хидроложка единица (HRU)	AREA
Количествени параметри на индикатор Същинска евапотранспирация	E _T mm
Качествена оценка на индикатор Същинска евапотранспирация	E _T _Assessment
Количествени параметри на индикатор Повърхностен отток	SURQ_GENmm
Качествена оценка на индикатор Повърхностен отток	SURQ_GEN_Assess
Количествени параметри на индикатор Сумарен отток	WYLD_mm
Качествена оценка на индикатор Сумарен отток	WYLD_Assessment
Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения	ESS_Assessment

Табл. 2.10 – Модел на очакваните резултати от инструмента за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения

Глава 3 МОДЕЛИРАНЕ НА НИВО ВОДОСБОРЕН БАСЕЙН И ВРЪЗКА С ИНДИКАТОРИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА ЕКОСИСТЕМНАТА УСЛУГА

3.1 Калибриране на модела SWAT

В рамките на изследването са генерирани първични резултати от хидроложкото моделиране и вторични резултати чрез създадения инструмент за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за две дати в рамките на тестовия район горен басейн на р. Огоста, една дата за тестови район басейн на р. Батулийска и месечни резултати за август отново за горния басейн на р. Огоста. Последните резултати са калибрирани чрез свободния софтуер SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs). Софтуерът извършва автоматично калибриране и е създаден специално за обработка на резултатите на модела SWAT. Разработен е от Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Той предлага няколко различни метода или програми за калибриране, от които е избрана SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Algorithm) на базата на предишни изследвания, които препоръчват тази методика: Khalid et al, 2016; Abbaspour, 2005; Arnold et al, 2012; Vervoort, 2017; Shope et al, 2014; Schuol et al, 2008; Боянова, 2015; Khalida et al 2016; (Chiang, L, 2014). На тази основа са избрани и входящи параметри за самото калибриране. То е извършено чрез пет итерации до постигането на задоволителен резултат. Всяка една итерация включва 500 симулации, които дават различни резултати, използвани за нови входящи параметри за следващата итерация. Процесът е трудоемък и изисква значителен времеви ресурс, тъй като всеки цикъл отнема до 10 часа в зависимост от

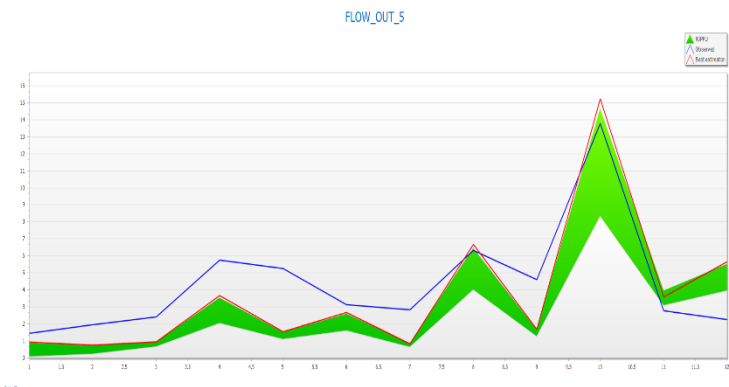
мощността на хардуера. Не всеки цикъл от симулации е успешен. При допускане на грешка или достигане на незадоволителен резултат процесът трябва да се извърши наново отначало. Поради тази причина постигането на задоволителен резултат тук отне приблизително три месеца.

Калибрирането е извършено на базата на месечни данни за речния отток в ст. Гаврил Геново за 2004 г. Основните статистически характеристики, значими при оценката на достоверността на симулацията на модела са:

Коефициентът на детерминация – R2. В рамките на това изследване коефициентът достига 0.61 при възможна скала от безкрайно отрицателна до +1. За успешна калибриране се зачита резултат между 0.5 и 1.

Наш-Ситклиф коефициентът на полезно действие (Nash-Sitcliffe efficiency – NSE. В рамките на това изследване е постигнат резултат от 0.52.

На Фиг. 3.1 чрез синята линия са представени стойностите на повърхностния отток, а в червено е представена най-добрата симулация от калибрирането. Зелената линия представлява „95%-ната неопределеност на симулацията (the 95% prediction uncertainty – 95PPU)“ (Боянова, 2015) – това е „количествена оценка на неопределеността на резултатите в следствие на неопределеността на параметрите“ (Боянова, 2015).



Фиг. 3.1 – Измерени и симулирани стойности на месечния речен отток и неопределеност на резултатите

Крайните резултати от калибрирането създават множество параметри, чрез които се извършва вторично калибриране. Хидроложкият модел ArcSWAT дава възможност за т.н. калибриране на ръка, чрез което потребителят замества първичните му параметри с тези от калибрирането. По този начин се извършва ново хидроложко моделиране с вече калибрирани стойности, а от там и автоматична оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения чрез създадения инструмент. Това означава, че резултатите от калибрирането вече могат да бъдат привързани към геометрични данни (в случая полигони), а именно към еднородните хидроложки единици (HRU). За всяко едно от изброените в началото на тази точка изследвания в рамките на района на р. Огоста са генерирани 3007 полигона, представляващи еднородни хидроложки единици.

3.2 Резултати от моделирането на водосборните басейни

В резултат на симулациите от хидроложкия модел ArcSWAT се създават геометрични и атрибутивни данни. Същинският резултат с количествени стойности представлява таблица със 75 показателя за всеки един полигон за всяка една дата. В този случай, тъй като съществуват 3007 еднородни хидроложки единици, първичният резултат представлява таблица с над 1 млн. реда информация за 2005 г. при посочено изискване за симулация на база денонощие за изследваната част от басейна на р. Огоста. За месечни стойности, използвани и при калибрирането, резултатът е таблица с 36 000 реда. При басейна на р. Батулийска съществуват 290 еднородни хидроложки единици, което означава, че резултатната таблица съдържа приблизително 106 000 реда. В тези първични таблици са налични и количествените стойности на избраните от нас индикатори за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения. Поради обема от информация, която трудно се обработва дори и на компютър, таблиците са представени чрез генерализация (Табл. 3.1 – 3.4).

Табл. 3.1

Количествени стойности на индикаторите за оценка /р. Огоста. 05.08.2005/		
Индикатори/Стойности (mm)	Мин. стойност	Макс. стойност
Същинска евапотранспирация	0	0.53
Повърхностен отток	0	0.134
Сумарен отток	0	3.811

Табл. 3.2

Количествени стойности на индикаторите за оценка /р. Огоста. 06.08.2005/		
Индикатори/Стойности (mm)	Мин. стойност	Макс. стойност
Същинска евапотранспирация	0.197	1.215
Повърхностен отток	0	84.41
Сумарен отток	0.17	84.462

Табл. 3.3

Количествени стойности на индикаторите за оценка /р. Огоста 08.2005/		
Индикатори/Стойности (mm)	Мин. стойност	Макс. стойност
Същинска евапотранспирация	22.19	112.311
Повърхностен отток	18.847	264.199
Сумарен отток	22.072	270.038

Табл. 3.4

Количествени стойности на индикаторите за оценка /р. Батулийска 06.08.2005/		
Индикатори/Стойности (mm)	Мин. стойност	Макс. стойност
Същинска евапотранспирация	1.941	4.739
Повърхностен отток	0	0
Сумарен отток	0.011	1.548

3.3 Инструмент за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения

Инструментът за оценка работи на няколко етапа или стъпки:

Въвеждащ етап: тази част от процесите си инструментът е представен чрез вече описаният диалогов прозорец. Т.е. тук той приема параметрите, нужни за изпълнението за задачите –

въвеждане на базата данни на ArcSWAT, посочване на папка за създаване на база данни с резултатите, въвеждане на дата.

Сортиращ етап: това е най-комплексната част от инструмента. Тук информацията от ArcSWAT се обработва на няколко нива и се записва в нова база данни.

Създаване на нова база данни – преди да се извърши каквато и да е манипулация на данните, трябва да се създаде ново работно място, в което потребителят да вижда само информацията, касаеща изследването. Затова инструментът, използвайки параметрите от диалоговият прозорец, създава нова геобаза данни, която носи името на избраната от потребителя дата. Например, ако тази дата е 05.08.2005, геобазата данни ще се нарича “Results05082005”. По този начин потребителят може да създаде в една папка неопределен брой резултати за различни дати. Ако иска да направи нова база с вече съществуваща дата, инструментът ще презапише резултатите. Т.е. инструментът предварително проверява дали съществува геобаза данни със същото наименование, а след извършването на операцията ще съобщи на потребителя за изпълнението на задачата.

Извличане на информация – за тази задача преди всичко трябва да се придаде вид на новосъздадената геобаза данни. Тя е празна и няма структура. Затова инструментът създава нови полета в нея, в които ще бъдат записани параметрите на индикаторите за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения. След това инструментът попълва новосъздадените полета с необработената информация за индикаторите за оценка само за желаната от потребителя дата

Оценяващ етап – в тази задача инструментът прилага вече описаната в предишната глава методика за оценка. За тази цел инструментът предварително създава нови колони, в които да

бъдат записани качествените оценки на индикаторите и самата екосистемна услуга за всяка еднородна хидроложка единица.

След всички тези процеси инструментът уведомява потребителя за завършването на процеса със съобщението „SUCCESS!“.

Следва ръчна обработка от страна на потребителя, в която резултатната геобаза данни се свързва с файла на еднородните хидроложки единици с помощта на релативен ключ, наречен HRUGIS. Той представлява уникалният идентификатор на еднородната хидроложка единица, а таблицата вече може да бъде визуализирана

Глава 4 ОЦЕНКА НА КАПАЦИТЕТА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА НАВОДНЕНИЯ

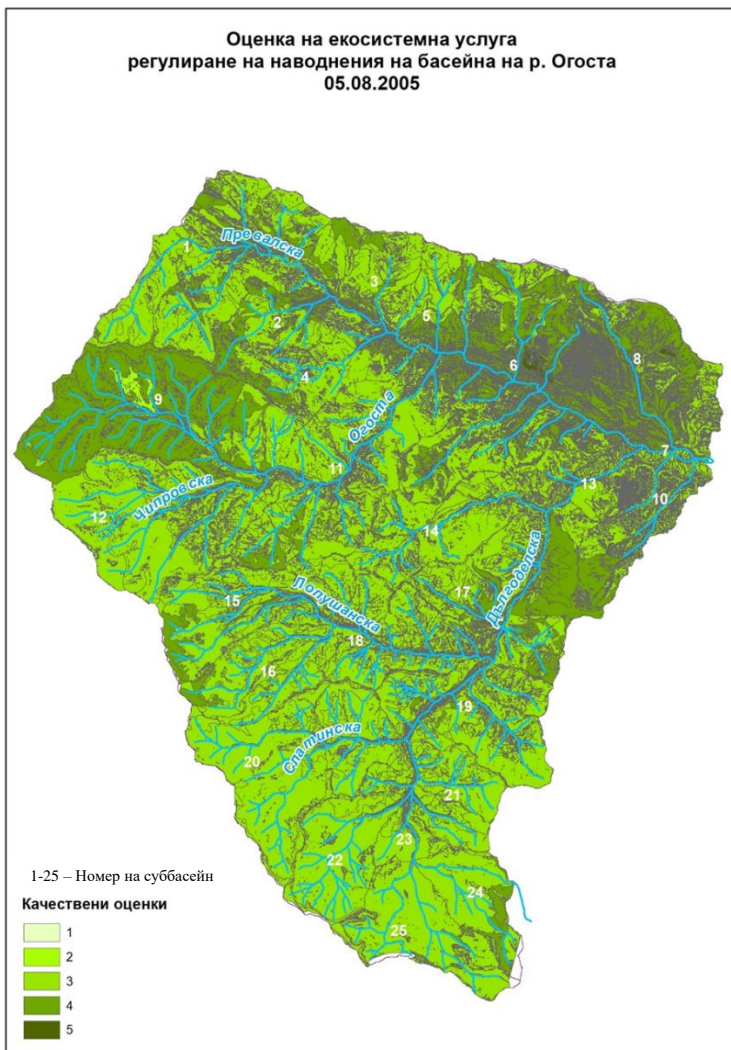
След извършването на хидроложкото моделиране и обработката на първичните резултати посредством разработения инструмент са генерирани качествени стойности на избраните индикатори, както и на крайната оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения. Оценките на всеки един индикатор са разгледани и описани, създадени са картосхеми, визуализиращи тези резултати. На същия принцип са анализирани и резултатите на крайните оценки. За всяка една оценка от 1 до 5 има описание на най-представителните за нея еднородни хидроложки единици и е извършена пространствена характеристика. Този модел на работа е приложен за всяка една от тестовите територии за всяка една дата. Съответно има четири описания за горното течение на р. Огоста (две с различни дати (ден/месец/година), едно с калибрирани месечни данни, едно със широко достъпни данни) и едно описание на р. Батулийска.

4.1 Оценка на базата на резултати за избрани дни със случаи на наводнения

Първите резултати, получени за горното течение на р. Огоста, са на базата на симулации за дата 05.08.2005г. Финалните качествени оценки, генерирани от инструмента, показващи нисък капацитет на екосистемна услуга регулиране на наводнения (оценка 2) на малки ареали, локализирани в горното течение на р. Огоста. Те заемат една 0.7% от изследваната територия. Съставлявани са от индустриални територии със стръмен наклон на склон, т.е. около териториите на населени места (Мартиново, Чипровци, Железна). Еднородните хидроложки единици с висока качествена оценка (4 и 5) заемат

приблизително 22% от изследваната територия, като са локализирани отново в Горното течение на р. Огоста, но обхващат и левите притоци на долното ѝ течение, както и това на р. Дългоделска Огоста. Те са заети от земеделски площи по речните долини, след което следват широколистни гори, преобладаващите почви са ранкери в западната част на територията/горното течение на р. Огоста, флувисоли в долното течение на р. Огоста и лувисоли при р. Дългоделска Огоста. Забелязва се, че тези единици не обхващат териториите около речните корита, т.е. заливните тераси, които са с оценка 3 (Фиг. 4.3, Табл. 4.3).

Оценка на екосистемна услуга
регулиране на наводнения на басейна на р. Огоста
05.08.2005



Фиг. 4.3 – Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за р. Огоста (05.08.2005)

Табл. 4.3 – Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за р. Огоста (05.08.2005)

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения		
Оценка	Площ (km ²)	Процент
2	4.10	0.73
3	433.38	77.33
4	122.01	21.77
5	0.93	0.17

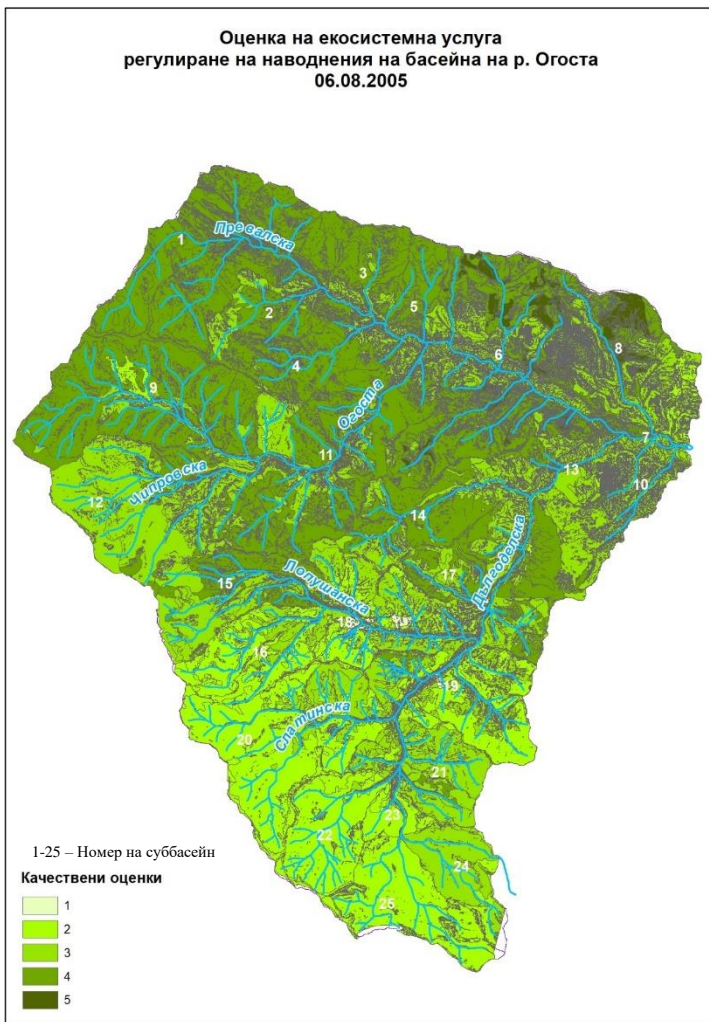
Изследваната територия ще бъде разгледана още един път, но сега данните ще бъдат генерирани за друга дата, в която е имало по-големи количества валеж. Съответно резултатите от създадения инструмент ще са за следващия ден **06.08.2005 г.** Отново ще бъдат описани подробно само еднородните хидроложки единици с площ по-голяма или равна на 0.1 km².

Веднага се забелязва, че крайните оценки за екосистемната услуга регулиране на наводнения са в желаната петобална скала. Това е така, заради разнообразието в данните на индикатора повърхностен отток – те варират между 0 и 68 mm. Благодарение на тях инструментът успява да направи ясно разграничение на капацитета на еднородните хидроложки единици за задържане на вода.

Тук ясно се вижда и градацията на териториалното разпределение на екосистемната услуга. В северните части на горния басейн на р. Огоста се забелязват преобладаващи оценки 4 и 5, докато в южната част преобладават оценки 2 и 3. Около долините на реките също най-често се срещат оценките 2 и 3. Еднородните хидроложки единици с оценка 2 заемат значителна територия от горното течение на р. Дългоделска Огоста и по-конкретно тази, обхващаща левите ѝ притоци, вкл. и планинските части.

Както се вижда в табл. 4.7, еднородните хидроложки единици с най-нисък потенциал за регулиране на наводнения са с най-малък дял от територията. Те отговарят на същите единици с ниски оценки по отношение на индикаторите – тези при р. Лопушанска. С оценка 2 са класифицирани териториите в планинския югозападен край на района и горното течение на р. Дългоделска Огоста. С оценка 3 са множество единици, разпространени из цялата изследвана територия. С такава оценка са заливните тераси на двете големи реки и техните притоци при средните и долните течения и изворните части на р. Чипровска. С оценка 4 са заети единиците в северните и централните планински и хълмисти части на територията, разделящи долините на р. Огоста, р. Дългоделска Огоста и р. Превалска. Тук се забелязва, че с такава оценка са и единици, заемащи част от заливните тераси на р. Огоста. Те се характеризират с комбинация от земеделски площи, голи скали и среден наклон на склон, т.е. имат оценка 4 и по трите индикатора. С оценка 5 са малки до средни по площ ареали, концентрирани в североизточния край на територията при левите притоци на р. Огоста. Те се характеризират с тревни съобщества или горски земи с лувисоли и среден до стръмен наклон на склон. Голяма роля при високо оценените единици играе южното изложение, при което има високи оценки на евапотранспирация (Фиг. 4.7, Табл. 4.7).

Оценка на екосистемна услуга
регулиране на наводнения на басейна на р. Огоста
06.08.2005



Фиг. 4.7 – Оценка по индикатор сумарен отток за р. Огоста
(06.08.2005)

Табл. 4.7 – Оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за р. Огоста (06.08.2005)

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения		
Оценка	Площ (km ²)	Процент
1	0.73	0.14
2	112.28	21.92
3	179.53	35.05
4	212.20	41.43
5	7.47	1.46

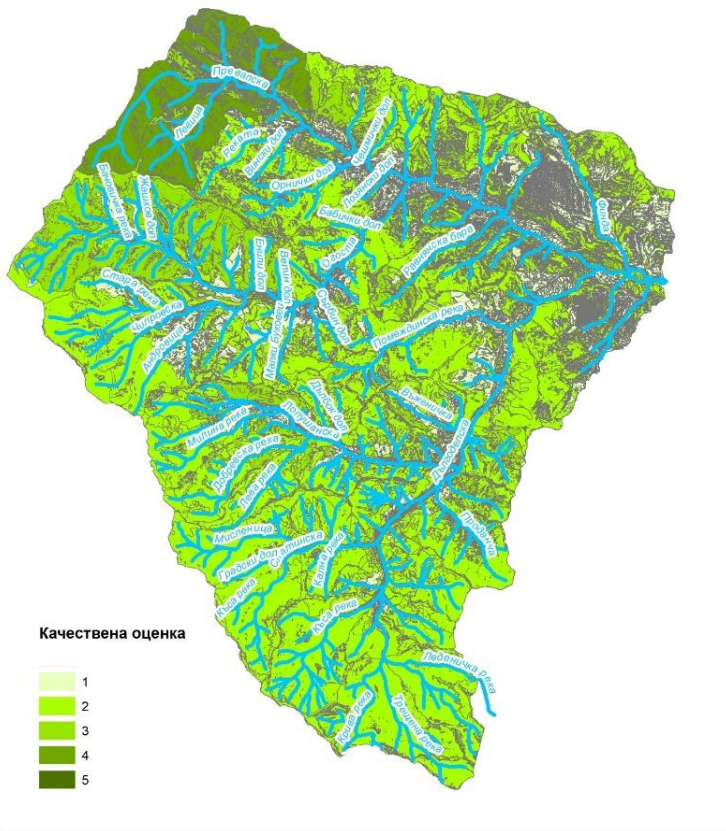
4.2 Оценка на базата на резултати с калибрирани месечни данни

Басейнът на р. Огоста е разгледан и с калибрирани месечни данни с помощта на специализирания софтуер за целта SWAT-CUP. Данните от модела показват отново очаквани резултати, при които еднородните хидроложки единици около заливните тераси на реките имат средни до ниски оценки и средни до високи при планинските райони на територията.

Оценките на еднородните хидроложки единици за екосистемната услуга регулиране на наводнения с месечни калибрирани данни наподобяват много предишните представени резултати. С ниски оценки са единиците, заемащи речните заливни тераси, докато в планинските части са тези с високи оценки. В случая най-високо оценени са хидроложките единици в суббасейн 1 в северозападния край на изследваната територия. Очаквано еднородните хидроложки единици с ниска оценка 1 са с комбинация от земеделски земи, лувисоли с полегат до среден наклон на склон. Те заемат 15% от изследваната територия. Единиците с оценка 2 представляват най-голям процент – близо 66%. От това е достатъчно да се заключи, че според тези данни територията има нисък капацитет за регулиране на наводнения. Разглежданите единици имат комбинация от горски територии,

камбисоли, литосоли, ранкери и стръмен наклон на склон. Единиците с оценка 3 са представени от ареали, разпръснати из цялата територия без ясно изразена структура, изключение прави един голям ареал в северозападния край на басейна в суббасейн 9. Те са заети от горски територии и земеделски земи с ранкери или камбисоли и стръмен наклон на склон. Единиците с оценка 4 и 5 заемат общо 6.12% от площта на територията и са локализирани изцяло в суббасейн 1. Те имат комбинация от горски територии, камбисоли и стръмен наклон на склон (Фиг. 4.10, Табл. 4.10).

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения
на басейна на р. Огоста
Калибрирани месечни данни за месец август



Фиг. 4.10 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения (август)

Табл. 4.10 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения (август)

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения		
Оценка	Площ (km ²)	Процент (%)
1	84.38	15.06
2	368.24	65.71
3	73.51	13.12
4	34.17	6.10
5	0.13	0.02

Анализ на получените резултати

Получените дотук резултати показват, че разработеният инструмент за определяне на капацитета на екосистемите за регулиране на наводнения дава възможност да се съставят карти, представящи пространственото разпределение на тази регулационна услуга. Анализът на тези получените карти води до следните констатации:

- Оценката получена по трите индикатора варира в определени граници, като при индикатора евапотранспирация капацитетът е по-нисък, а при индикатора сумарен отток е по висок;
- При някои от картите се получава непълен набор от оценки;
- Между картите по отделните индикатори се наблюдават определени различия в районите с нисък и висок капацитет за регулиране на наводнения;
- Сравнението между получените резултати за капацитета за регулиране с картите на земното покритие и почвите показва ниска степен на съответствие.

Всичко това показва, че получените резултати не са достатъчно прецизни и трябва да се установи причината за

наблюдаваните несъответствия. След задълбочен анализ на данните от симулациите беше установено, че количеството на валежите в отделните части на басейна е различно и това се отразява в значителна степен на стойностите за отделните индикатори. Следователно прилагането на автоматично определяне на капацитета за цялата територия на басейна води до получаване на оценки, които отразяват не само регулационната функция на екосистемата, но и различията във валежните количества. Второто не е част от регулационната функция на екосистемите и това води до изкривяване на получения резултат. Освен това при определяне на капацитета на базата на дневни стойности хидроложкото събитие се разделя на отделни части и получените резултати за отделните дни се различават отново заради различията в количеството на валежите.

4.3 Оценка на базата на резултати за няколко поредни дни с наводнение и отчитане на разликите във валежните количества

Установените в предходната част недостатъци на подхода налагат да се направят определени корекции с цел получаване на по-прецизни резултати. На първо място, вместо оценка по отделни дни е избран целия период на хидроложкото събитие, водещо до образуване на наводнение. Това е направено на базата на анализ на количеството на речния отток по време и за времето преди и след наводнението. Началната дата се определя от времето, в което започва покачването на оттока, а за крайна – датата, на която речният отток достига следващата ниска стойност, при която се стабилизира в следващите няколко дни. По този начин периода за изследване е определен между датите 05.08.2005 и 09.08.2005, т.е. период от пет дни. Така оценката се прави за едно цялостно събитие, в което може по-ясно да се

изясни регулационната роля на екосистемите в басейна. На второ място, на базата на пространственото разпределение на валежите са определени четири ареала, в които сумарното количество на валежите за периода е относително еднакво. При определянето на интервалите за дефиниране на отделните класове капацитет за всеки от ареалите е направен отделен анализ. Съответно за всеки от ареалите е определен специфичен набор от интервали. По този начин влиянието на количеството на валежа при определянето на капацитета за регулиране се изключва и полученият резултат отразява в по-голяма степен регулационния потенциал на екосистемата посредством способността ѝ да задържа и преразпределя вода.

Площите с оценка 0 за екосистемната услуга регулиране на наводнения заемат незначителна част от територията – едва 0.6%. Те са разположени във вече разгледаните ареали с индустриални земи в горното течение на р. Огоста, съчетани с ранкери и литосоли, един ареал с рядка растителност при средното ѝ течение с рендзини и последен, трети отново с индустриална територия с планосоли при средното течение на р. Дългоделска. Площите с оценка 1 заемат широки ареали при течението на р. Помеждинска, заливните тераси на р. Дългоделска и средното течение на р. Огоста – общо 8% от територията. Тук в зависимост от географското положение преобладават широколистни гори и земеделски земи (при р. Дългоделска). Съответно първият тип ареали са в комбинация с литосоли и стръмен до полегат наклон, а вторият с флувисоли и лувисоли и среден до полегат наклон.

Площите с оценка 2 заемат 16% от площта на територията, като са локализирани около долините на реките в планинските и преходно-планинските части на района. Заемат изцяло долината на горното течение на р. Дългоделска с

прилежащите ѝ притоци, територията на десните ѝ притоци, почти цялата долина на р. Лопушанска, левия бряг на р. Помеждинска, района около р. Въженичка и тънка ивица по течението на р. Огоста и отделни ареали около нея. Тези територии са заети главно от земеделски земи, следвани от горски територии в централните части. Съответно почвите са литосоли и лувисоли. Наклонът е преобладаващо стръмен до среден. Площите с оценка 3 заемат 27% от изследваната територия. Те включват значителна част от течението и територията около р. Огоста – горно, средно и долно (заливните тераси), долината на р. Превалска, територията между десните притоци на р. Дългоделска, както и изворните части при реките Стара, Чипровска и Андровица. Тези територии са заети главно от широколистни гори (изворите на реките Стара и Андровица с ранкери, горните притоци на р. Превалска с камбисоли и литосоли, долните десни притоци при р. Дългоделска с лувисоли), следвани от територии с рядка растителност (билните части между изворите на реките Стара и Андровица с ранкери, както и при отделни ареали в южните части на басейна) и земеделски земи при заливните тераси на р. Огоста с флувисоли и лувисоли. По площ най-разпространени са както следва литосоли, ранкери, лувисоли и камбисоли. Наклонът на склон е разнороден. Значителна част от територията на района има висока оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения 4, а именно 41% от нея. Обхваща главно планинските територии в западната част на изследваната територия, както и по-малки ареали между притоците на реките Огоста и Дългоделска, вкл. и територии около техните заливни тераси, които имат по-ниски оценки. Те са представени главно от широколистни и смесени гори с камбисоли и ранкери. Тези територии имат стръмен до среден наклон на склон. Еднородните

хидроложки единици с максимална оценка 5 заемат 7.6% от изследваната територия и представляват множество малки до средни ареали по басейна. Наблюдават се две големи струпвания – едното е при изворните части на р. Огоста, а второто при тези на р. Превалска и нейните десни брегове. Другите единици са локализирани в южните планински части на басейна. Единиците са представени главно от смесени гори лувисоли (Albic Luvisols (La)). Други често срещани почви са камбисоли и ранкери. Преобладава стръмен до среден наклон на склон (Фиг. 4.14, Табл. 4.14).

Табл. 4.14 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения

Интегрална оценка		
Оценка	Площ (km ²)	Процент (%)
0	3.43	0.61
1	46.31	8.30
2	87.94	15.76
3	148.83	26.67
4	229.10	41.05
5	42.54	7.62

4.4 Оценка на капацитета за регулиране на наводнения при използване на различни входни данни

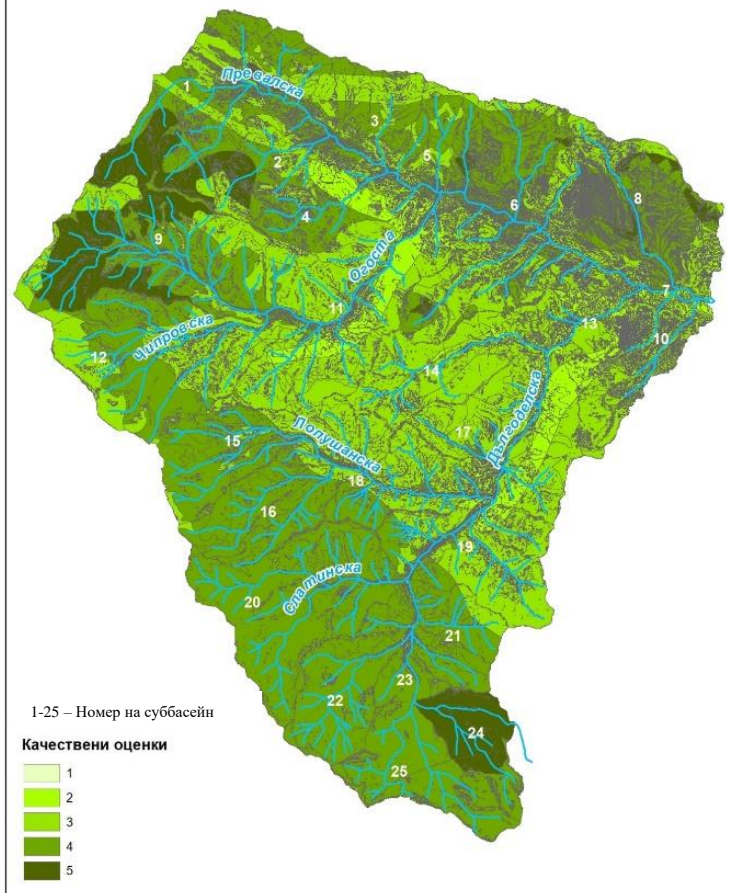
За целите на изследването е направен анализ и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения на басейна на р. Огоста при наличието на свободностъпни и автоматично генерирани данни. Това означава, че за основа на хидроложкия модел ArcSWAT са използвани само данни от базата на Министерство на околната среда и водите – Japan International Cooperation Agency – JICA. Тук голяма роля играе липсата на дъждомерни станции. Най-голяма тежест това оказва върху количествените и качествените стойности на индикатора повърхностен отток, при който и за двете примерни дати 05.08.2005г. и 06.08.2005г. има минимално количество вода и оттам максимална оценка при всички еднородни хидроложки единици, което на практика премахва значението на този индикатор при такъв сценарии и крайната оценка се генерира на базата на другите два индикатора. По тази причина този индикатор няма да бъде разглеждан. Въпреки това финалните стойности от модела и създадения инструмент дават очаквани резултати. Освен това при използването на свободно достъпни генерализирани данни прави впечатление по-слабата диверсификация на пространствения аспект на крайните оценки.

Т.е. има много по-ясно разграничение при оценките на индикаторите и финалния резултат.

Качествените оценки на екосистемната услуга регулиране на наводнения има ясно пространствено разделение, като те намаляват заедно с надморската височина. По високите планински райони са локализирани еднородните хидроложки единици с оценка 5, след което следват тези с оценка 4. Единиците с оценка 3 заемат планинските дерета и равнинно хълмистите райони, докато тези с оценка 2 са при заливните тераси при средното и долното течение на реките Дългоделска Огоста, Огоста и Превалска.

Еднородните хидроложки единици с оценки 5 и 4 са заети с горски територии и камбисоли. Оценените единици с 3 са комбинация от горски територии или земеделски земи с лувисоли и литосоли. Ниско оценените територии са заети от земеделски площи и широколистни или смесени гори в перифериите им с флувисоли (Фиг. 4.17, Табл. 4.17).

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения
на басейна на р.Огоста
Свободнодостъпни данни



Фиг. 4.17 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения (свободно достъпни данни)

Табл. 4.17 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения (свободно достъпни данни)

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения		
Оценка	Площ (km ²)	Процент (%)
2	35.04	6.25
3	242.80	43.32
4	244.83	43.69
5	37.75	6.74

4.5 Оценка на капацитета за регулиране на наводнения в басейна на река Батулийска

В рамките на изследването е направен анализ на басейна на р. Батулия повторно със свободностъпни данни. Тук отново за индикатор повърхностен отток липсва диверсификация на количествените данни и качествените оценки, поради което те не подлежат на разглеждане. Въпреки това още веднъж има очакван краен резултат, при който за долините на реките и техните речни тераси имаме ниски оценки – в случая 3. Силно разчлененият релеф помага за ясното разграничаване и категоризацията на териториите.

При анализ на крайните оценки на екосистемната услуга регулиране на наводнения се забелязва ясното им разграничение във вертикален аспект. Най-слабо оценените еднородни хидроложки единици с оценка 3 заемат заливните тераси на реките и деретата горските райони. Поради тази причина те са комбинация от земеделски земи с полегат наклон на склон или широколистни гори със стръмен наклон на склон и камбисоли. Хидроложките единици с оценка 4 обхващат приблизително 20% от изследваната територия, като образуват буферна зона около териториите с оценка 3. Те са комбинация от земеделски земи и тревни съобщества с камбисоли и стръмен наклон на склон.

Единиците с максимална оценка 5 заемат над 70% от територията. Те са заети почти изцяло от широколистни гори, камбисоли и стръмен наклон на склон (Фиг. 4.20, Табл. 4.20)



Фиг. 4.20 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения

Табл. 4.20 – Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения

Оценка на екосистемна услуга регулиране на наводнения		
Оценка	Площ (km ²)	Процент (%)
3	17.72	6.78
4	53.31	20.39
5	190.35	72.83

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия дисертационен труд е представено изследване насочено към доразвиване на методологичния подход за оценка и картографиране на екосистемната услуга регулиране на наводнения чрез прилагане на хидроложко моделиране в ГИС среда с модела ArcSWAT и специално създаден за нея ГИС инструмент. Разработеният в настоящата работа вариант на подхода включва няколко етапа: 1) Обработка на входните данни; 2) Хидроложки моделиране; 3) Генериране на параметри за оценка чрез инструмента в ГИС; 4) Оценка на капацитета по индикатори; 5) Оценка на капацитета за регулиране на наводнения за избраната територия; 6); Визуализация на резултатите. Обработването на входните данни е особено важно, за да се осигури необходимата информация на входа на хидроложкия модел ArcSWAT, чрез който се генерират т. нар. първични количествени резултати. Разработен е ArcGIS инструмент, който извършва обработка на тези резултати и генерира количествени данни за оценката на екосистемната услуга. Тези данни се използват като параметри за избрани индикатори, чрез които се извършва оценката на екосистемната услуга. Пространственият анализ на данните се извършва на базата на полигонален векторен слой с еднородни хидроложки единици. Всяка от тези териториални единици представлява уникална комбинация от почви, земно покритие и наклон на склон. Това осигурява много висока степен на диференциация на водосборния басейн и също толкова висока степен на детайлност на извършваните анализи. По този начин капацитетът за задържане на вода се определя на базата на максимално подробна пространствена информация за трите основни фактора, които влияят върху него: почви, земно покритие и наклон на склона. В

резултат се получава масив от пространствени данни за капацитета на екосистемите в басейна по отношение регулирането на наводнения, който служи за генериране на карти на тази услуга.

В настоящата работа са създадени серия от карти в различни времеви периоди и с различни данни. Представени и предоставени са данни в геометричен и табличен вид, както и тяхната визуализация и анализ за горния басейн на р. Огоста както следва:

За всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за дата 05.08.2005г.

За всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за дата 06.08.2005г.

Комплексна оценка за всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения в рамките на 5 дни между 05.08 и 09.08.2005г.

Оценка за всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения на базата на калибрирани данни за месец август.

Оценка за всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения на базата на широко достъпни данни за месец август.

За Басейна на р. Батулийска са представени резултати за всеки от трите избрани индикатора и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения за дата 06.08.2005г.

Подходът е приложен за два отделни водосборни басейна с различна обезпеченост с данни. За горното течение на р. Огоста са използвани данни с висока резолюция специално подготвени за прецизно моделиране в ArcSWAT. Симулирани са случаи със

слаб валеж и с по-интензивен валеж при калибрирани месечни данни. След това подходът е приложен с използване на широко достъпни данни с по-ниска резолюция. За басейна на река Батулийска подходът е приложен само с широко достъпни данни, за да се тества приложимостта му за други басейни, където липсва подробна предварителна подготовка, каквато има за басейна на р. Огоста.

За изпълнението на целта и задачите се използват няколко различни по предназначение софтуера: хидроложкият модел ArcSWAT, модел за калибриране SwatCup (използва се само когато е необходимо калибриране), стандартни инструменти за обработка на данни и визуализация в ArcGIS, а за да се достигне ниво на автоматизация, е разработен инструмент, който да създаде крайния резултат. Това придава интердисциплинарен характер на този дисертационен труд, тъй като обхваща елементи от хидрологията и хидроложкото моделиране, екосистемните услуги, географските информационни системи и програмирането. Въпреки че ArcSWAT е един от най-широко използваните хидроложки модели, неговото приложение в сферата на екосистемните услуги все още е ограничено.

Методиката за оценка на регулирането на наводнения чрез приложение на модела KINEROS и анализ на моделните резултати с данни за земното покритие (Nedkov and Burkhaed, 2012) осигурява подходящ инструментариум, но е сравнително трудоемка. Предлаганият в настоящата работа подход е автоматизиран в значително по-голяма степен благодарение на разработения за целта ГИС инструмент. Всъщност това е и един от основните плюсове на разработения подход – бързото генериране на крайни резултати. Самата работа с ArcSWAT и генерирането на първичните данни отнема няколко часа, в което ще се състои и основната работа на бъдещия потребител.

Инструментът за оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения успява да обработи и създаде крайни данни в рамките на минута. На този етап това, което се изисква, е да се посочи местоположение на базата данни с първична информация, да се посочи желаното местоположение на финалната база данни и да се посочи желана дата. За създаването на карти, представящи резултата от оценката на регулационната услуга, се изисква допълнителна обработка чрез функционалностите за картографиране в ArcGIS, което е рутинна операция.

Второто предимство на подхода е, че показва задоволителни резултати както при използване на предварително подготвени данни с висока резолюция, така и с широко достъпни генерализирани данни. Като доказателство за това са представени карти на двата басейна с различни данни, където основната прилика е пространствената характеристика на еднородните хидроложки единици и техните оценки на екосистемната услуга регулиране на наводнения. Независимо от избраната дата и типа на данните районите с нисък капацитет обикновено са локализирани около реките, заливните тераси и деретата с ниска степен на залесеност, докато добре залесените територии в планинските райони са с по-висок капацитет. За да се установи с пълна увереност това твърдение, са необходими по-нататъшни изследвания в други водосбори, но дори и само с резултатите от това изследване ясно се вижда че генералната картина е сходна, а различията са главно в степента на детайлност, следствие от качеството на данните.

Третото предимство на методиката е високата степен на прецизност и детайлност на получените резултати. Благодарение на първичните резултати от хидроложкото моделиране са създадени пространствени единици под формата на полигонен слой, представляващ еднородните хидроложки единици. След

автоматизираната обработка чрез създадения от нас инструмент всеки един полигон носи информация за почвеното покритие, земното покритие, наклона на склон, повърхностен отток, сумарен отток, евапотранспирация и оценка на екосистемната услуга регулиране на наводнения. Това е сериозно предимство в сравнение с моделите, които генерират резултати на ниво суббсаейн или моделен елемент. И в двата случая размерността на териториалните единици, в рамките на които се генерират и съответно осредняват симулираните параметри е по-голяма в сравнение с еднородните хидроложки единици (HRU) в ArcSWAT. Това дава възможност с много по-голяма степен на прецизност да се идентифицират районите с голям капацитет за регулиране на водните потоци и следователно за превенция на наводнения и прави методиката приложима в едромащабни изследвания и за формулиране на мерки за превенция на локално ниво, където нуждата от такива е най-голяма.

Четвъртото предимство на подхода е самият процес на генерализация и извличане на данни. Както вече бе посочено, хидроложкият модел ArcSWAT генерира огромен масив от данни дори и при малки територии. Представеният инструмент предоставя възможността тези данни да бъдат сортирани и филтрирани, което създава предпоставка за по-лесното им разчитане.

Въпреки всичко е нужно да се посочат и някои недостатъци и ограничения на представения подход. Интердисциплинарният му характер изисква от потребителя солидна подготовка в различни научни и технически сфери. Тъй като инструментът за оценка е вече създаден и готов за ползване, програмирането не е нужно да се включва в предвижданите дейности. Все пак работата с хидроложкият модел ArcSWAT остава основна задача на потребителя. Моделът е изключително чувствителен и може

да даде грешка или незадоволителни резултати при лош подбор на данни, времеви период и дори при актуализация на операционната система, което може да доведе до загуба на данните. С подобен проблем се сблъскахме и при настоящото изследване. Моделът не работи гладко при приложение за водосборни басейни в Източна Европа, поради което трябва да бъде променена локацията на компютъра, мерните единици за температура на въздуха, типът на дата (mm/dd/yyyy) и др.

За получаване на задоволителни резултати (свързани с целите на изследването, а не в строго хидроложки) не е нужно калибриране, но когато трябва да се извърши такава процедура, изискванията към потребителя се увеличават. Той трябва да се запознае с още един софтуер, създаден специално за калибриране на данни от ArcSWAT, а именно SwatCup. А за да може да работи коректно с него, той трябва да има налични специализирани данни за климата и речния отток. Освен това е необходимо допълнително време за подробно запознаване с редица научни трудове, които включват калибриране с този модел. Всичко това е значителен времеви ресурс, а както е описано в Глава 3, самото калибриране също изисква голямо количество време и мощен хардуер.

Третият недостатък на представената методика е пряко свързан с нейното трето предимство – подробността на данните. При работа с детайлни данни се създават значителни количества еднородни хидроложки единици. В случая на горната част на басейна на р. Огоста са генерирани 3007 броя комбинации под формата на полигони. Когато резултати са толкова разнообразни, те са трудни за генерализиране и интерпретация, а това възпрепятства достигането до ясни и точни изводи, тъй като всеки един от тях има налично изключение.

Отделно от позитивите и негативите на подхода, трябва да се посочи, че той има потенциал за усъвършенстване. Възможно е да бъдат добавени, заменени или изцяло премахнати индикатори за оценка чрез самия код на инструмента или да се добави опция за избор на индикатори в диалоговия му прозорец, с което да се даде възможност за експерименти. Тъй като се обработват изцяло дигитални данни, е възможно да се разработят допълнителни симулации и сценарии. Например посредством промяна на земното покритие в дадена част на водосборния басейн при определен сценарий на развитие на територията. Т.е. може да се зададе и отговори на въпроса – какъв ще бъде резултатът, ако в заливната тераса се проведе залесяване на мястото земеделски територии. Както и обратното – какъв ще бъде резултатът, ако се заменят определени горски територии с обработваеми земи. Това може да се извърши сравнително лесно чрез рекласификация на входните данни преди хидроложкото моделиране. По този начин е възможно да се генерират редица резултати с потенциални сценарии, които биха могли да дадат важна информация при планиране на мероприятия за превенция от наводненията.

Преобладаващите качествени оценки за екосистемната услуга регулиране на наводнения за горната част на басейна на р. Огоста за денонощие са 3 и 4. Изключение от правилото прави изследването с калибрирани месечни данни, където преобладаващата оценка е 2. Независимо от типа на данните или времевия период се наблюдава тенденцията, че с ниски оценки са териториите около речните долини и заливните тераси, докато тези с високи оценки са локализиращи в горските територии и планинските райони, което е логичен и очакван резултат. Въпреки общите тенденции, че с ниски оценки преобладават еднородните хидроложки единици с комбинация земеделски

територии/пасища с флувисоли и малък наклон на склон, а с високи – горски територии, камбисоли и стръмен наклон на склон, важна роля играе и надморска височина. Минималните и максималните оценки имат най-малка пространствена репрезентация, най-вече тези с оценка 5, които често са под 1%. С това може да се заключи, че територията има среден до висок капацитет за регулиране на наводнения. Подобна е и тенденцията при тестовия район басейна на р. Батулийска (Фиг. 4.20), където благодарение на разчленение на релефа много ясно се разграничава вертикалното разпределение на качествените оценки. Тук преобладаващата оценка е максималната 5, което се дължи на физикогеографските характеристики, а именно дълбоките речни долини, които естествено ограничават задържането на вода там.

Приноси на дисертационния труд:

1. В дисертацията е развит методичен подход за оценка на екосистемната услуга регулация на наводнения чрез използване на ГИС-базиран хидроложки модел ArcSWAT и матричен подход за визуализация на резултатите. Подходът надгражда над предложенията от Nedkov and Burkhard (2012) чрез прилагането на по-модерен ГИС интерфейс и по-функционален хидроложки модел.
2. Хидроложкият модел SWAT е адаптиран и калибриран за целите на оценката на екосистемата услуга регулиране на наводнения, което се прави за първи път в страната. Разработката надгражда към работата на Боянова (2015), която прилага същия модел за други свързани с водите екосистемни услуги.

3. Разработен е ГИС инструмент за извличане определени резултати от ArcSWAT, чрез който се съкращава значително и се автоматизира технологичния процес по оценка на екосистемната услуга. Инструментът е разработен чрез програмиране в Python и се предлага за първи път.
4. Подходът за оценка на екосистемната услуга е тестван в два водосборни басейна с различна обезпеченост с данни. Резултатите от теста доказват, че след успешно калибриране в район с добра обезпеченост с данни моделът може да се прилага и за водосборни басейни със сходни характеристики и наличие само на широко достъпни данни с по-ниска степен на детайлност.

Публикации по темата на дисертацията

Nikolov P, Hristova D, Stoycheva V (2022) Modeling of flood regulation for ecosystem accounting: a case study of Ogosta river basin. *Journal of the Bulgarian Geographical Society* 46: 3-10. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e86288>.

Nikolov P, Nedkov S (2020) Flood Regulating Ecosystem Services—Mapping and Assessment Tool Based on ArcSWAT Output Data. In: Nedkov S et al. *Smart Geography. Key Challenges in Geography*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28191-5_29.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- Николова, М., Недков, С. 2012. Рискът от наводнения. ГИС моделиране на компонентите на околната среда за оценка на риска от наводнения.
- Below, R., Wirtz, A., & Guha-Sapir, D. (2009). Disaster Category Classification and Peril Terminology for Operational Purposes.
- Morrison, R. R., Jones C. N., Lininger K., Thoms, M. C., Wohl Ellen. 2024. Resilient floodplains in the Anthropocene, Pages 41-68, ISBN 9780323917162, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91716-2.00035-2>.
- Evans L. and Oehler-Stinnett, 2004. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp
- Hall J.W., P.B. Sayers, and R.J. Dawson, 2005. National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales. *Natural Hazards*, 36(1-2), 147-164. In: *Managing the Risk of Extreme Events and Disaster to Advance climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582.
- Mokrech M., R.J. Nicholls, J.A. Richards, C. Henriques, I.P. Holman, and S. Shackley, 2008. Regional impact assessment of flooding under future climate and socioeconomic scenarios for East Anglia and North West England. *Climatic*

- Change, 90, 31-55., 2008. In: Managing the Risk of Extreme Events and Disaster to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582.
- Barredo, J., and G. Engelen, 2010 Land Use Scenario Modeling for Flood Risk Mitigation, *Sustainability*, 2,1327-1344; (doi:10.3390/su2051327)
- Jongman B, Winsemius HC, Aerts JC, Coughlan de Perez E, van Aalst MK, Kron W, Ward PJ. Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2015 May 5;112(18):E2271-80. doi: 10.1073/pnas.1414439112. Epub 2015 Apr 20. PMID: 25902499; PMCID: PMC4426429.
- U.S. National Weather Service, 2004. Flood Severity Category Evaluation
- Попов, А. 2011. Географски информационни системи
- Singh, V.P., Woolhiser, D.A., 2002. Mathematical Modeling in Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, July/August, 270-292.
- Singh, Vijay P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology
- Arnold et al. 1994. SWAT: Soil and Water Assessment tool.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005) *Ecosystems and human wellbeing: Current state and trends*. Island Press, Washington, DC.
- Guerra CA, Maes J, Geijzenborffer I, Metzger MJ (2016) An assessment of soil erosion prevention by vegetation in Mediterranean Europe: Current trends of ecosystem service provision. *Ecological Indicators* 60:213-222.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68 (3), 643–653.
- de Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., Willemsen, L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7,260–272.
- Nedkov S, Burkhard B (2012) Flood regulating ecosystem services – Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators* 21: 67-79.
- Vihervaara P, Mononen L, Santos F, Adamescu M, Cazacu C, Luque S, Geneletti D, Maes J (2017) 4.1. Biophysical quantification In: Burkhard B. and Maes J. (eds) *Mapping Ecosystem Services*. Pensoft Publishers, Sofia. ISBN 978-954-642-830-1 (e-book)
- Karabulut A, Egoh BN, Lanzanova D, Grizzetti B, Bidoglio G, Pagliero L, Bouraoui F, Aloe A, Reynaud A, Maes J, Vandecasteele I, Mubareka S (2016) Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water–food–energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem Services* 17: 278-292.