

из озер Белое, Волянское, Святое за счет их полезного объема (16,34 млн м<sup>3</sup>) разрешался отбор воды в годы 50- и 75%-ной обеспеченности не более 5,78 млн м<sup>3</sup>/год.

В 1998 г. украинской стороной было введено ограничение на забор воды из озер Волянское и Святое (уровень которых должен быть в пределах отметок 147,1–146,9 м). Ограничение колебания воды в пределах 0,2 м объясняется тем, что эти озера отнесены к числу водно-болотных угодий международного значения, и нельзя допускать более значительные колебания уровня воды, чтобы не помешать нересту рыбы и гнездованию водоплавающей птицы. В связи с необходимостью постоянного поддержания высоких уровней воды полезный объем воды озер резко уменьшается с 16,75 до 2,44 млн м<sup>3</sup>.

Кроме указанных требований, необходимо обеспечивать безаварийный пропуск экстремальных половодий в условиях жесткого ограничения пропускной способности сооружений; оборудовать рыбозащитные сооружения; вести гидрологический мониторинг и многоадресную оперативную отчетность; согласовывать свои действия с заинтересованными организациями.

Перечисленные требования вступают в противоречие. Так, требование пропуска предельно возможных расходов паводочных вод практически не может быть реализовано в условиях выполнения главного требования по регламентации отметок уровней воды озер Белое, Волянское и Святое.

В таблице 4.39 приведен годовой водохозяйственный баланс Днепроовско-Бугского канала, выполненный ЦНИИКИВР в 2000 г.

Таблица 4.39 – Сводный годовой водохозяйственный баланс Днепроовско-Бугского канала, млн м<sup>3</sup>

Наименование статей баланса	Обеспеченность года, %	
	75	95
<b>Приход</b>		
1. Сток, формирующийся на водосборе	631,5	378,3
2. Сток, поступающий из бассейнов рр. Припяти, Западного Буга, Лесной, Ясельды, в том числе для:	5,78	5,78
а) рыбного хозяйства;		
б) водообеспечения сельхозугодий;		
в) поддержания судоходных глубин в Днепроовско-Бугском канале	5,78	5,78
3. Промышленно-бытовые сбросы сточных вод	12,0	12,0
4. Сработка водохранилищ (озер), прудов и прудов рыбхозов	9,4	9,4
<b>Всего:</b>	<b>658,7</b>	<b>405,5</b>
<b>Расход</b>		
1. Потребность в воде на увлажнение сельхозугодий, в том числе:	83,8	112,2
а) с гарантированным увлажнением и орошением	22,5	11,7
– за счет сработки прудов, водохранилищ, прудов рыбхозов и поступления из бассейнов рек Припяти, Зап. Буга, Лесной, Ясельды;	1,1	1,1
– за счет местного стока;	21,4	10,6
б) с негарантированным увлажнением за счет стока рек в летнее время	61,3	104,6
2. Заполнение каналов осушительно-увлажнительной сети	7,6	7,6
3. Промышленно-бытовые заборы	0,1	0,1
4. Забор воды в водохранилища (озера) и пруды	1,7	1,7
– безвозвратные потери на испарение и фильтрацию	0,6	0,6
5. Забор воды в пруды рыбхозов	9,3	9,3
– безвозвратные потери на испарение и фильтрацию	1,0	1,0
6. Безвозвратные потери на испарение с водной поверхности ДБК	2,4	3,7
7. Безвозвратные потери на фильтрацию через напорные дамбы ДБК	2,3	2,3
<b>Всего:</b>	<b>108,8</b>	<b>138,5</b>
1. Суммарный сброс стока, в том числе:	569,4	344,1
в р. Западный Буг;	384,8	225,0
в р. Припять	204,6	119,1
2. Дефицит воды на увлажнение шлюзованием и орошение дождеванием	19,5	77,1
3. Дефицит воды для рыбного хозяйства	-	-

#### 4.5. Особенности управления водным режимом территории ландшафтного заказника «Званец»

##### 4.5.1. Анализ особенностей гидрологического и гидрогеологического режимов территории заказника «Званец»

###### Источники водного питания территории и их режим

Водный баланс ограниченного участка суши, к которому можно отнести территорию заказника «Званец», или в целом водосборной площади речного бассейна формируется в процессе сложного

взаимодействия приходящих и расходуемых ресурсов влаги в пределах деятельного почвенного слоя за расчетный интервал времени. При отсутствии антропогенного воздействия главными источниками влаги в деятельном (испаряющем) слое являются атмосферные осадки, конденсация водяных паров и поступление влаги из нижних слоев почвы. Основные потери влаги в деятельном слое происходят за счет инфильтрации и суммарного испарения, которое имеет наибольшую значимость в вегетационный период, когда к физическому испарению добавляется транспирация. В отдельные периоды года актуален горизонтальный приход (расход) влаги в деятельном почвенном слое, обусловленный внутрпочвенным и поверхностным стоком. В этом случае влажность слоя почвы равна полной влагоемкости ( $W_{пв}$ ). На рисунке 4.42 представлена схема потоков влаги в рассматриваемом слое: земная поверхность – грунтовые воды, где используются следующие обозначения:

- $H_p$  – расчетный почвенный слой;
- $H_{угв}$  – глубина залегания зеркала грунтовых вод;
- $H_k$  – высота подъема капиллярной каймы в исследуемых почвогрунтах;
- $X$  – сумма атмосферных осадков, поступивших на земную поверхность;
- $C$  – конденсация;
- $Z$  – суммарное испарение;
- $W_{п}$  – влажность поверхности почвогрунта;
- $W_{нв}, W_{пв}$  – соответственно наименьшая и полная влагоемкость;
- $W_n, W_k$  – запасы влаги в рассматриваемом слое почвы, соответственно на начало и конец расчетного интервала времени;
- $V_{ср}$  – средняя за расчетный период влажность почвы в долях от  $W_{нв}$ ;
- $Y_n, Y_o$  – приток на участок и отток с него поверхностных вод;
- $J$  – инфильтрация почвенной влаги из расчетного слоя почвогрунтов в более глубокие слои зоны аэрации;
- $G$  – приток (подъем) почвенной влаги в расчетный слой (грунтовая составляющая вертикального влагообмена);
- $D_n, D_o$  – приток и отток внутрпочвенных вод в рассматриваемом слое;
- $\pm \Delta H_{угв}$  – величина приращения (уменьшения) уровня залегания грунтовых вод;
- $U_n, U_o$  – горизонтальный приток и отток грунтовых вод.

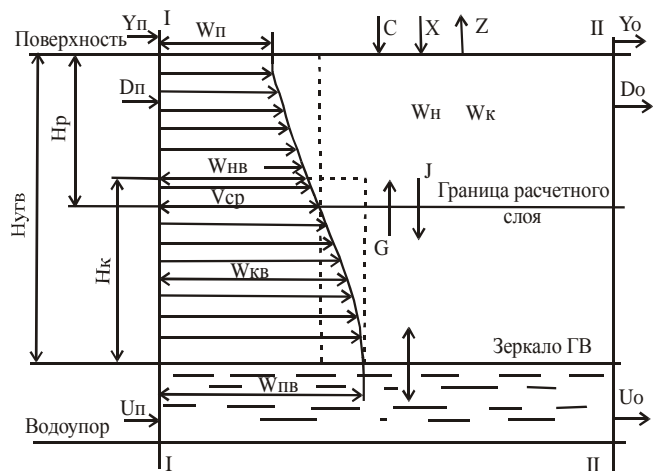


Рисунок 4.42 – Расчетная схема потоков влаги в системе: подстилающая поверхность – грунтовые воды

Представленные на рисунке 4.42 потоки влаги суммарно характеризуют водный баланс расчетного слоя почвогрунта и являются приходными и расходными статьями уравнения водного баланса. В природе могут наблюдаться различные соотношения векторов влагопереноса, как и различные частные случаи сочетания глубины залегания уровней грунтовых вод ( $H_{угв}$ ), высоты капиллярной каймы в реальных почвогрунтах ( $H_k$ ) и мощности расчетного почвенного слоя ( $H_p$ ).

$$\begin{cases} H_p < H_{угв} > H_k + H_p, \\ H_p < H_{угв} = H_k + H_p, \\ H_p < H_{угв} < H_k + H_p, \\ H_p = H_{угв} > H_k, \\ H_p = H_{угв} = H_k, \\ H_p = H_{угв} < H_k. \end{cases} \quad (4.29)$$

Для всего рассматриваемого слоя почвогрунтов уравнение водного баланса имеет вид

$$X + C + G + D_n + Y_n + (W_n - W_k) = Z + J + D_o + Y_o. \quad (4.30)$$

Интегральной характеристикой естественной увлажненности земель является влажность зоны аэрации – среды обитания корневой системы растений ( $W_n, W_k$ ). Глубина расчетного слоя почвы ( $H_p$ ) в реальных почвенно-геологических условиях Беларуси составляет 30–60 см [546]. Почвенные влагозапасы на конкретном участке суши являются производной от количества и динамики поступления в расчетный слой почвы влаги за счет выпадающих атмосферных осадков, почвенно-грунтовых, склоновых и намывных вод. Рабочее уравнение водного баланса, решаемое относительно почвенных влагозапасов, имеет вид [525]

$$W_k = W_n + KX_i - Z_{oi} - Y_i + G_i - J_i, \quad (4.31)$$

где  $i$  – расчетный период;  $K$  – поправочный коэффициент, отражающий недоучет атмосферных осадков, измеряемых осадкомерными приборами;  $Y_i$  – суммарный сток.

Полученное значение влагозапасов ( $W_k$ ) должно укладываться в оптимальные пределы  $W_{врк} \leq W_{опт} \leq W_{нв}$ , где  $W_{врк}$  – влажность разрыва капиллярных связей как нижнее пороговое значение оптимальных почвенных влагозапасов.

Территория заказника «Званец» примыкает к водораздельному бьефу Днепровско-Бугского канала на севере, ограничена Белоозерским и Ореховским каналами с востока и запада соответственно. Фактически она относится к водосбору р. Мухавец [282]. В связи с этим, руководствуясь бассейновым принципом управления водными ресурсами, рассмотрим режим увлажнения территории заказника «Званец» в контексте исследования водосбора р. Мухавец (рис. 4.43), в частности, его восточной части.

Следует отметить недостаточно надежную обеспеченность исследуемой территории данными инструментальных наблюдений за режимами влагообеспеченности. Ближайшими метеостанциями к участку являются: Брест (85 км), Пружаны (65 км). Пинск (80 км) находится на другом водосборе. Метеостанция Дрогичин, находящаяся в непосредственной близости от исследуемой территории, имеет недостаточно длинные ряды наблюдений за большинством необходимых в исследованиях климатических характеристик.

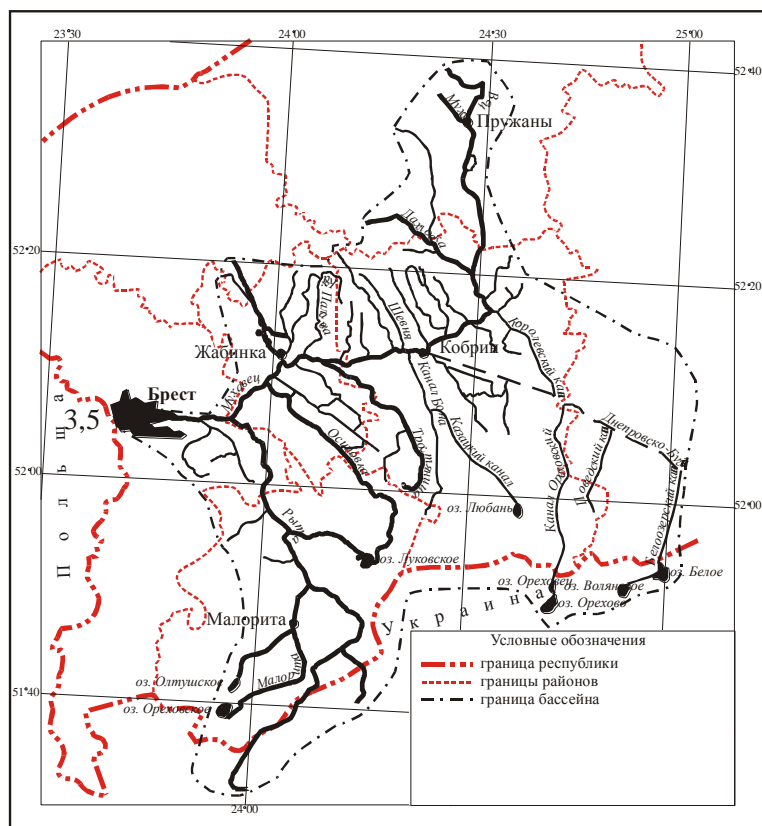


Рисунок 4.43 – Схема водосборной площади реки Мухавец

Уровенный режим поверхностных и грунтовых вод непосредственно на территории заказника «Званец» исследовался с 1999 г. [30], в результате чего установлен типичный для низинных болот гидрологический режим. Весной болото заливается паводковыми водами на глубину до 20–50 см

выше поверхности земли. В середине мая уровни воды достигают поверхности и постепенно снижаются в июне – октябре на 10–50 см ниже поверхности земли.

В таблице 4.41 приведены результаты расчета водного баланса для территории заказника «Званец». В качестве исходных данных приняты: мелкозалежный осоково-тростниковый торфяник низинный с мощностью торфа 50 см, наименьшая влагоемкость – 305 мм, влажность разрыва капиллярных связей – 232 мм; атмосферные осадки с учетом поправок на ветровой недоучет и смачивание осадкомерного ведра; средние многолетние значения дефицитов влажности воздуха; параметр, зависящий от водно-физических свойств и гранулометрического состава почвы  $r = 1,2$ ; параметр, учитывающий гидравлические условия стока  $n = 3,3$ ; коэффициент расхода тепла на испарение – 0,9; сумма температур воздуха больше 10 °C = 2523.

Таблица 4.41 – Результаты расчета водного баланса для территории заказника «Званец»

Элемент баланса	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Теплый период	Год
Атмосферные осадки, мм	254,8	66,8	78,0	99,0	79,0	60,0	58,0	495,0	777,0
Максимально возможное испарение, мм	71,7	113,8	151,8	143,3	115,9	80,1	42,2	718,8	801,0
Относительная влажность	1,281	1,068	0,878	0,828	0,800	0,800	1,171		
Относительная средняя влажность	1,315	1,114	0,919	0,839	0,806	0,800	0,859	0,950	1,070
Относительное испарение	0,922	0,862	0,763	0,708	0,683	0,678	0,722	0,763	0,816
Суммарное испарение, мм	66,1	98,2	115,8	101,5	79,2	54,3	30,5	545,6	619,2
Почвенные запасы, мм	102,3	130,9	135,9	114,2	87,6	59,9	34,6	665,4	776,8
Климатический сток, мм	36,2	32,8	20,1	12,6	8,4	5,6	4,1	119,9	157,6

Расчеты водного баланса для территории заказника «Званец» выполнены без учета грунтовых вод с целью оценки количества атмосферных осадков, расходуемых на испарение и установление типа водного питания земель. Как показывает таблица 4.41, испарение за теплый период года (546 мм) превышает осадки (495 мм), и с учетом близкого расположения грунтовых вод к поверхности в этот период можно сделать вывод о преобладающем грунтовом типе водного питания земель. Однако весной велика роль снегозапасов, в совокупности питающих грунтовые воды и формирующих поверхностный сток. В итоге можно сделать вывод о грунтово-атмосферном типе водного питания территории заказника.

Кроме того, необходимо отметить, что для рек бассейна р. Мухавец характерна наибольшая доля грунтового стока (37–40 %) и наименьшая доля весеннего стока (36–49 %), так как в районе преобладают песчаные и супесчаные хорошо водопроницаемые почвы, которые способствуют значительной инфильтрации снеговых и дождевых вод, их аккумуляции и отдачи в реки в период межени. Так же, как и общий сток, поверхностный сток данного региона – наименьший для республики [282].

#### *Схема движения водных масс*

Разделение территорий на бассейны рек и анализ структуры поверхностного стока – одна из наиболее типичных операций в гидрологических и экологических исследованиях. Речные бассейны могут выступать в качестве основной территориальной единицы при районировании территорий, оценке стока, прогнозировании изменений гидрологического режима и управлении им. Река – естественный водный поток, текущий в выработанном им русле, питающийся за счет стока с его водосбора. С понятием «река» тесно связано понятие «водоток». Водоток – водный поток с движением воды в направлении уклона в углублении земной поверхности. От понятия «река» понятие «водоток» отличается тем, что оно применимо и для естественных потоков воды (рек), и для искусственных (каналов). Обратим внимание на то, что в этих определениях нет никаких ограничений по размерам водосбора. Отсюда вполне допустимо использование термина «речной бассейн» применительно к водосборам отдельных водотоков любого размера [444].

Технологии автоматического разграничения бассейнов рек доступны с середины 80-х годов и были внедрены в различные программные пакеты ГИС и специализированное программное обеспечение. В геоинформационных системах моделирование речных бассейнов выполняется на базе цифровых моделей рельефа, которые предоставляют высокий уровень информации о рельефе местности.

Для качественного описания и численного моделирования гидрологических систем к настоящему времени разработан широкий спектр подходов и соответствующих математических моделей. Тем не менее такие подходы не имеют универсального характера и ориентированы на моделирование конкретных речных бассейнов или отдельных процессов, формирующих сток. Необходимость разработки заключается в построении общего алгоритма, пригодного для моделирования речных бассейнов.

#### *Алгоритм моделирования речных бассейнов*

Ниже предлагается алгоритм моделирования речных бассейнов средствами ArcGIS 10. Он предполагает обработку цифровой модели рельефа (ЦМР) функциями гидрологического моделирования, которые встроены в расширение Spatial Analyst Tools. Алгоритм определения водосборного бассейна реки (водотока) представлен следующими этапами.

1. Построение цифровой модели рельефа. Исходными данными послужили топографические планы масштаба 1:50 000, данные дистанционного зондирования поверхности земли, а также данные рекогносцировочных исследований. Обобщая имеющиеся данные, с помощью модуля 3DAnalyst построена ЦМР (цифровая модель рельефа) как сетка с размером ячейки 25 м.

2. Заполнение некорректных понижений рельефа. Для заполнения некорректных понижений рельефа применена функция Fill [3], при помощи которой выполняется коррекция сетки, без которой невозможно построение сетки кумулятивного стока с адекватными значениями. Данная функция производит коррекцию значений рельефа до тех пор, пока не заполнятся все понижения в пределах определенного диапазона Z. Наглядно действие данной функции можно проследить при построении раstra кумулятивного стока для одной и той же местности.

3. Построение сетки направлений стока. Функция Flow Direction позволяет классифицировать направление стока по 8 румбам (рис. 4.44).

4. Построение сетки кумулятивного стока функцией Flow Accumulation. Сетка кумулятивного стока строится на основании поверхности уклона, т. е. сетки направления потоков, полученного на предыдущем шаге.

5. Идентификация ячеек водотока со значениями кумулятивного стока выше заданного. На этом этапе выполняется процедура выбора предельного значения кумулятивного стока с помощью инструмента Con. Инструмент Con (сокращение от conditional, что означает «удовлетворяющий условиям») находится в наборе инструментов Условия (Conditional). Функция Con, важная часть команды ArcGrid, необходима для определения корректности значений ячеек входных данных и комплексного контроля выходных данных. Инструмент Con – упрощенная версия этой функции [259] (рис. 4.45).

6. Определение водотоков-звеньев функцией Stream Link. Водотоки-звенья – это сегменты канала потоков, связывающих два последовательных узла, узел и точку выхода или узел и точку водораздела.

7. Присвоение порядка каждому звену сети функцией Stream Order. Каждый водоток, являющийся звеном сети, классифицируется по присвоенному порядку, который зависит от взаимосвязи водотоков.

8. Определение дренажной площади каждого звена функцией Watershed. Дренажная, или водосборная, площадь бассейна водотока вычисляется на основании сетки направления потоков и набора водотоков, для которых она вычисляется.

В результате выполнения данного алгоритма представляется возможным построение водосборных бассейнов различного порядка для каждого элемента гидрологической сети на основании ЦМР исследуемой местности.

#### *Исследование речных бассейнов*

На основании проведенных исследований цифровой модели рельефа установлено, что значения коэффициента кумулятивного стока зависят от количества бассейнов, на которые необходимо разделить речную сеть. Исследования проведены для значений кумулятивного стока 15 с шагом 50. Для каждого значения с помощью функции Stream Link рассчитано количество водотоков-звеньев. Таким образом, степень детализации водотоков зависит от значения кумулятивного стока, на который влияют характеристики рельефа, в частности от уклона местности. Необходимость детализации водотоков главным образом зависит от решаемых задач, одной из которых может быть планирование системы водоотведения.

Как результат, получена схема движения водных масс по поверхности. В этом случае пока не учитываются условия движения водных масс при различной шероховатости. Учет данного обстоятельства возможен на основе анализа аэрокосмических снимков в видимом диапазоне или отдельными каналами. Уточнение условий движения водных масс также возможно на основе непосредственных наблюдений за количеством и видовым составом растительности на поверхности болотного мас-

сива. Наложение картины шероховатости поверхности на карту (схему) структуры поверхностного стока позволят построить карту гидравлических уклонов для конкретных гидравлических условий. Под конкретными гидравлическими условиями понимаются наблюдаемые или измеренные условия шероховатости поверхности болотного массива.

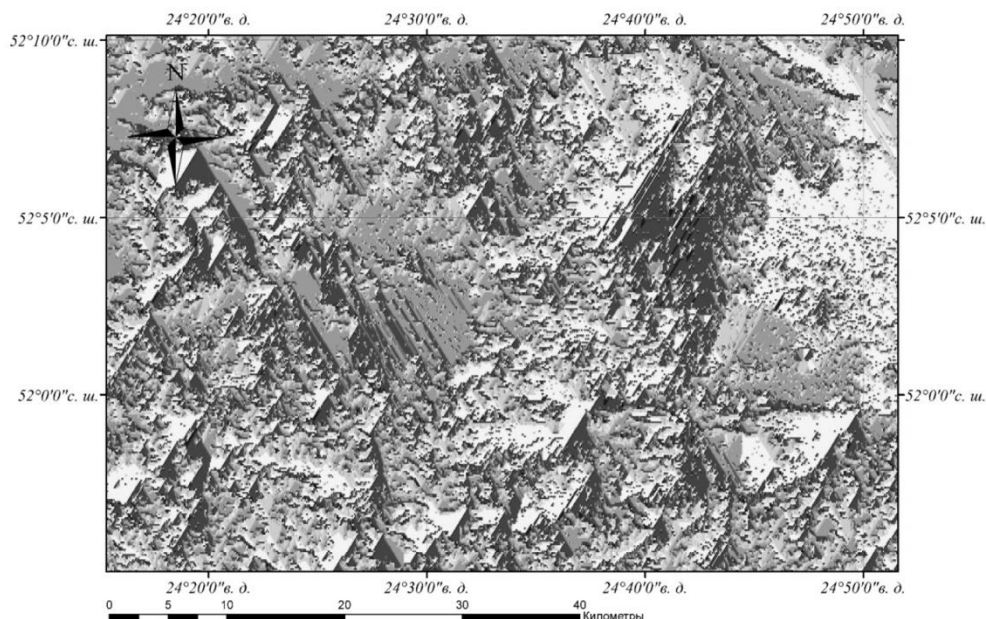


Рисунок 4.44 – Схема направлений стока в пределах территории заказника «Званец»

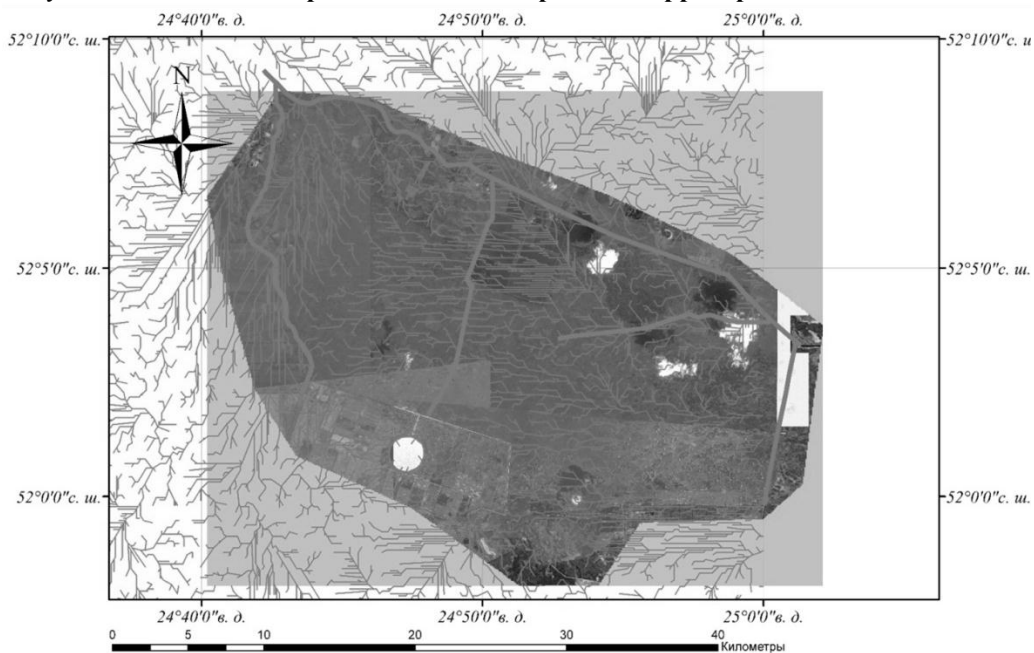


Рисунок 4.45 – Схема кумулятивного стока в пределах территории заказника «Званец»

*Исходные данные, необходимые для составления физико-математической модели*

Для разработки алгоритма моделирования водного режима малого водосбора, куда относим территорию заказника «Званец», предполагаем использовать сегментный подход. Водосбор рассматривается как ландшафт со склонами и водотоками. Весь участок водосбора разделяем на сегменты (участки ландшафта), каждый из которых характеризуется однородностью биотипа, одинаковым расположением почвенных слоев и разделяется по вертикали в зависимости от степени увлажнения. Расчет водного режима содержит два одномерных уравнения: движение влаги в ненасыщенном слое оценивается уравнением вертикального влагопереноса; когда фильтрационный поток достигает влагонасыщенного слоя почвы, начинается горизонтальное движение, описываемое нелинейным уравнением Буссинеска [127]. Водный режим склона определяется процессами, представленными на рисунке 4.46.

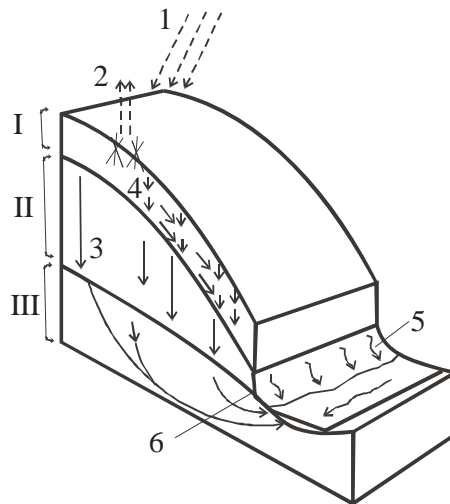


Рисунок 4.46 – Гидрологические процессы в пределах склона:

I–IV – почвенный покров, зона инфильтрации, подземные воды и водоток соответственно;  
1–6 – атмосферные осадки, транспирация, инфильтрация, движение влаги в условиях неполного насыщения, разгрузка из открытых каналов и высачивание из насыщенной части почв

Для моделирования водного режима почвы необходимы данные, характеризующие гидрофизические свойства почвогрунтов исследуемого объекта, а также климатическая информация. Для реализации физико-математической модели нами разрабатывается программа, позволяющая установить алгоритм моделирования и принять к использованию окончательную модель. Исходные данные представлены двумя блоками: гидрофизические свойства почвогрунтов; климатическая информация.

На рисунке 4.47 показан пользовательский интерфейс разработанной программы, включающий исходные данные по первому блоку.

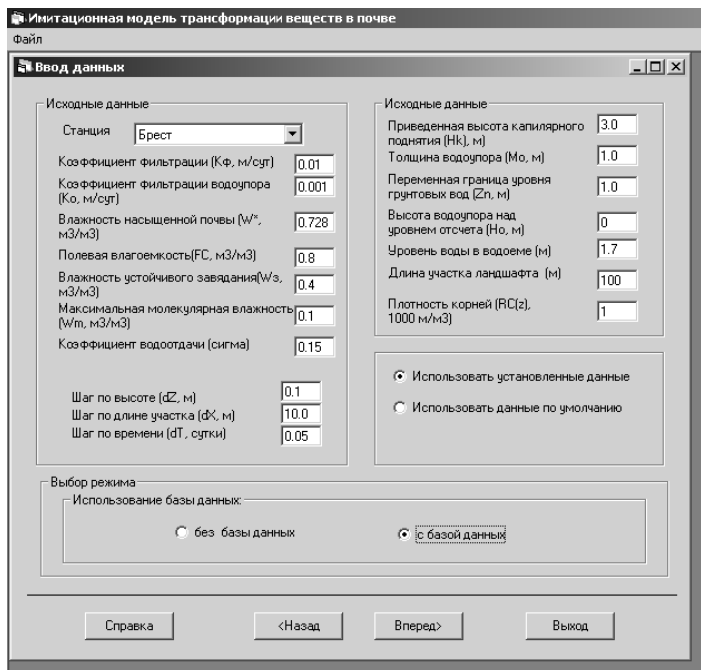


Рисунок 4.47 – Окно ввода водно-физических свойств почвогрунтов и выбора параметров моделирования

Климатическая информация включает в себя данные, учитывающие атмосферное увлажнение (атмосферные осадки, их суммы и интенсивность за различные временные интервалы) и данные, позволяющие выполнить расчеты суммарного испарения (дефициты влажности воздуха, температуры воздуха и почвы, радиационный баланс и др.). Использование средних многолетних данных по ближайшим метеостанциям (Брест, Пружаны, Пинск, Дрогичин) позволит получить обеспеченные величины водного режима для различных по увлажненности лет. Использование текущей климатической информации по метеостанции Дрогичин позволит выполнять моделирование и давать рекомендации по управлению водным режимом территории заказника в реальном времени.