МРНТИ 06.81.23

Секция: Химия/География/Экология

статья

Влияние колебаний уровня Каспийского моря на гидрологический режим дельты реки Жайык.

Серик Ахметов к.г.н.

[1] НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; serik.akhmetovkz@gmail.com

* Корреспонденция: serik.akhmetovkz@gmail.com

Аннотация: В работе рассматривается влияние колебаний уровня Каспийского моря на особенности гидрологического режима дельты реки Жайык (Урал). В исследовании установлено, что колебания уровня Каспийского моря оказывают значимое подпорное воздействие на гидрологический режим дельты реки Жайык. Показано, что повышение уровня моря способно вызывать подъём уровня воды в дельтовой зоне реки без фактического увеличения речного стока и объёма воды в русле. Выявлено, что подпор из морской акватории приводит к изменению распределения уровней и скоростей течения в нижнем течении Жайыка, изменяет пропускную способность русловой сети и влияет на частоту затоплений низменных участков дельты. Полученные результаты демонстрируют необходимость учёта подпора моря при анализе гидрологического режима, оценке водности и планировании водохозяйственных мероприятий на прикаспийских реках.

Ключевые слова: Каспийское море; подпор; река Жайык; дельта; уровень воды; гидрологический режим; сток; русловые процессы; прикаспийские реки.

Цитирование: Будет добавлено редакцией в процессе публикации. Beisembayev, W., Maybolsynov, H., Ivanov, Y. (2025). The title of the paper. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 150(1), 1-5. https://doi.org/10.3390/xxxxx

Академический редактор: Имя Фамилия

Поступила: date
Исправлена: date
Принята: date
Опубликована: date

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

1. Введение

Дельтовые области крупных рек, впадающих в замкнутые или полузамкнутые водоёмы, отличаются высокой чувствительностью к изменениям уровня принимающей акватории. К таким системам относится дельта реки Жайык, расположенная в зоне влияния Северного Каспия. В отличие от рек, впадающих в открытые моря, гидрологический режим Жайыка в его нижнем течении определяется не только внутренними речными процессами, но и колебаниями уровня Каспийского моря, которые имеют собственный ритм и значительные амплитуды.

За последние десятилетия уровень Каспия неоднократно демонстрировал тенденции к повышению и понижению, что неизбежно отражалось на состоянии прибрежных экосистем и русловой сети прилегающих рек. В таких условиях оценка водности и уровня воды в дельте Жайыка требует учёта не только притока из верхнего течения, но и возможного подпорного воздействия со стороны моря. Подпор приводит к тому, что уровень воды в реке в дельтовой части может увеличиваться даже при неизменном или сниженном речном стоке, что существенно усложняет интерпретацию наблюдений и расчёт гидрологических характеристик.

Проблема подпора актуальна не только для научных исследований, но и для практики водного хозяйства, поскольку повышение уровня в низовьях реки может провоцировать затопление низменных участков, изменять условия водообмена, влиять на скорость течения и формировать ложные представления о фактической водности Жайыка. При этом в существующих материалах зачастую не проводится чёткое разграничение между подъёмом уровня, вызванным внутренними речными процессами, и подъемом, обусловленным влиянием моря.

Учитывая современные тенденции изменения уровня Каспийского моря и растущую потребность в точных данных для управления водными ресурсами, исследование подпорного воздействия на дельту Жайыка приобретает особую значимость. Анализ этого влияния позволяет не только уточнить структуру гидрологического режима реки, но и повысить надёжность прогнозов, необходимых для защиты территорий, планирования хозяйственной деятельности и оценки экологического состояния прибрежной зоны.

2. Материалы и методы

Исследование влияния уровня Каспийского моря на гидрологический режим дельты реки Жайык выполнялось на основе анализа многолетних наблюдений за расходами и уровнями воды на ключевых гидрологических постах. В качестве исходных данных использовались ряды суточных и среднемесячных значений расходов и уровней воды на участках Махамбет и Атырау, а также уровней воды на устьевом посту Форт-Шевченко, отражающем изменения уровня Каспийского моря. Для обеспечения сопоставимости данные были приведены к единому временному ряду и очищены от очевидных выбросов и пропусков.

Для оценки взаимосвязей между участками реки применялись методы классического корреляционно-регрессионного анализа. На первом этапе выполнена оценка парных коэффициентов корреляции между расходами на постах Махамбет и Атырау, а также между уровнем Каспийского моря и уровнем воды в Атырау. Данный анализ позволил выявить основной вклад речного стока и определить степень влияния морского подпора на внутридельтовую гидродинамику.

На втором этапе была построена множественная регрессионная модель вида:

$$Q_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$$
$$H_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$$

позволяющая оценить комбинированное воздействие речного притока и морского уровня на формирование стока в дельте. Для анализа применялись стандартные статистические показатели: множественный коэффициент корреляции (R), коэффициент детерминации (R^2), стандартная ошибка модели и проверка значимости коэффициентов регрессии. Модель строилась с использованием линейного подхода, поскольку он обеспечивает интерпретируемость и позволяет выявить первичные зависимости между переменными.

Пространственный анализ проводился на основе схемы русловой сети дельты, что позволило интерпретировать полученные статистические результаты в контексте реальных гидравлических процессов. Особое внимание уделялось идентификации механизмов обратного подпора — изменения наклона водной поверхности от устья к верхним участкам дельты при высоких уровнях Каспия.

Таким образом, сочетание статистических методов и гидрологической интерпретации данных обеспечило целостное понимание динамики водного режима дельты реки Жайык и выявление роли морского фактора в его формировании.

3. Результаты

Дельта реки Урал – уникальная природная система, формируемая в условиях низменного рельефа и специфических климатических особенностей.

Дельта реки Урал характеризуется высокой чувствительностью к внешним морским воздействиям, в особенности к сгонно-нагонным явлениям. Эти явления могут, как обогащать дельту пресной водой, так и вызывать обратные процессы, влияющие на её экологическое состояние. Эти процессы, обусловленные преимущественно ветровыми воздействиями над акваторией северного Каспия, вызывают значительные колебания уровня воды в дельтовой области, которые не связаны напрямую с изменением объёма речного стока.

Для изучения характера этого влияния была проведена обработка и анализ гидрологических данных, полученных с наблюдательных постов, расположенных в пределах дельты и на примыкающих участках побережья Каспийского моря. В этой связи для изучения динамики изменения уровня и расхода воды в реке Урал были выбраны речные посты пос.Махамбет и г.Атырау а также морской наблюдательный пост МГ-I Форт-Шевченко. Сбор данных по речным постам пос.Махамбет и г.Атырау а также морскому наблюдательному посту МГ-I Форт-Шевченко включает в себя гидрологические данные с 1936 года по 2023 годы. Не смотря на то, что данные посты функционирует большой промежуток времени, они имеют большую прерывистость рядов наблюдений. Общие гидрологические сведения по речным и морским постам занесены в таблицу 1.

Таблица 1 Основные гидрологические сведения

Река	**Пост**	**Период действия станции, год открытия**	**Площадь водосбора, км^2**	**Расстояние от устья, км**
р. Урал	пос. Махамбет	1932	230000	145
р. Урал	г. Атырау	1915	236000	27
	МГ-I Форт-Шевченко	1921		

За многолетний период наблюдений на постах имеются пропуски в рядах наблюдений, для того что бы заполнить пробелы в рядах данных проведено восстановление недостающих данных. Восстановление пропусков в наблюдениях и приведение данных к многолетнему периоду с 1936 по 2023 год осуществлено на основе уравнений связи. В качестве опорного пункта, как наиболее репрезентативными, были приняты посты аналоги. Для восстановления отсутствующих в рядах наблюдений данных за многолетний период для посту г.Атырау в виде аналога был выбран пост пос.Махамбет, для поста МГ-I Форт-Шевченко аналогам выбран МГ-II Актау.

По данным уровней и расходов воды р.Урал-г.Атырау, р.Урал-пос.Махамбет и МГ-I Форт-Шевченко были построены графики связи среднегодовых расходов и уровней воды за многолетний период (рисунок 1).

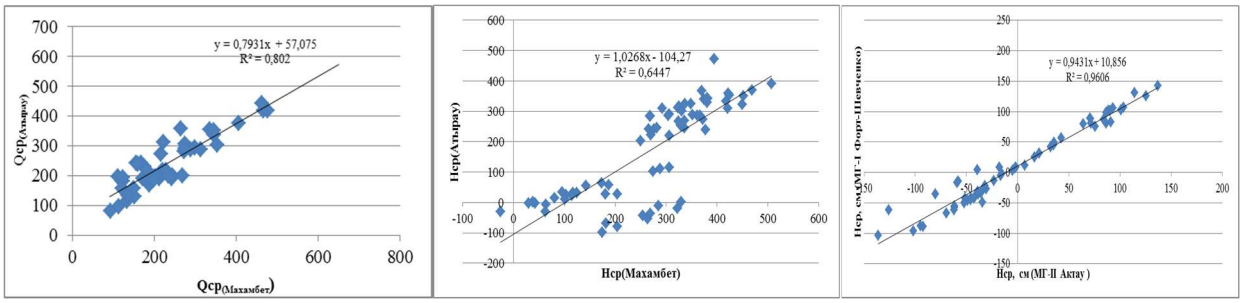

Рисунок 1. График связи среднегодовых расходов и уровней воды за многолетний период.

В процессе подготовки массива информации были восстановлены фрагментарно утраченные данные, после чего выполнена проверка их репрезентативности с использованием статистических методов. Результаты расчётов сведены в таблицу 2 и использованы для дальнейшего анализа.

Таблица 2. Статистические данные и уравнения связи годового стока

река-пост	**период наблюдения**	**Qср, м^3/с, Нср см**	**σQ/H, %**	**Cv**	**σCv, %**	**Cs**	**уравнение связи**

Расходы воды							
р.Урал-пос. Махамбет	1936-2023	250	5,5	0,51	8,51	1,36	
р.Урал-г.Атырау	1936-2023	256	4,40	0,41	8,2	1,14	y = 0,7931x + 57,075
Уровни воды							
р.Урал-пос. Махамбет	1936-2023	260	5,40	0,48	8,8	-0,4	y = 0,6279x + 162,39
р.Урал-г.Атырау	1936-2023	162	10,69	0,95	11,0	-0,08	y = 1,0268x - 104,27

Для обеспечения надёжности последующего анализа предварительно была выполнена проверка репрезентативности восстановленных гидрологических данных. Данный этап был необходим вследствие наличия пропусков в ряде временных рядов, которые были восстановлены.

Результаты оценки показали, что восстановленные данные обладают высокой степенью репрезентативности. Для расчетов были использованы данные с продолжительностью наблюдений более 70 лет. Основные статистические характеристики восстановленных временных рядов соответствуют аналогичным показателям фактических наблюдений в пределах допустимых отклонений. Выявленные корреляционные связи (таблица 3) с данными сопредельных постов подтверждают достоверность полученной информации.

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции для восстановленных и контрольных рядов наблюдений

а) расходы воды

r	Махамбет	Атырау
Махамбет	1	
Атырау	0,96	1

б) уровни воды

r	МГ-I Форт-Шевченко	МГ-II Актау
МГ-I Форт-Шевченко	1	
МГ-II Актау	0,99	1

в) уровни воды

r	Махамбет	Атырау
Махамбет	1	
Атырау	0,83	1

Таким образом, массив данных был признан пригодным для использования в дальнейшем анализе, направленном на изучение зависимости уровня воды в дельте от фонового уровня воды на реке Урал.

Анализ множественной корреляции как метод оценки взаимосвязей в речной и приустьевой гидрологической системе.

Для комплексного понимания взаимодействий между различными гидрологическими параметрами в пределах русловой и приустьевой частей реки Урал, целесообразно применять методы множественного корреляционного анализа. В отличие от парной корреляции, множественная корреляция позволяет оценить совокупное влияние сразу нескольких факторов (независимых переменных) на один целевой показатель (зависимую переменную). Это особенно актуально при анализе пространственно распределённых гидрологических данных, где на уровень или расход воды могут одновременно влиять как локальные, так и удалённые источники.

В рамках проведённого исследования был выполнен расчёт коэффициентов множественной корреляции между временными рядами:

- расходы и уровни воды в районе поселка Махамбет (р.Урал-пос. Махамбет расположенный в 145 км от устья)
- уровней воды в нижнем течении реки Урал (р.Урал-г.Атырау пост расположен в 27 км от устья)
- уровней у прибрежной зоны Каспийского моря (МГ-I Форт-Шевченко).

Анализ множественной корреляции был выполнен по двум типам модели (табл 4):

а) $Q_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$

б) $H_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$

Таблица 4. Результаты анализа множественной корреляции

Зависимая переменная (Y)	Предикторы (X_1, X_2)	Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка	Среднее значение Y
Расход воды в Атырау (Q, м³/с)	$X_1 = Q_{Махамбет}$; $X_2 = H_{Форт\text{-}Шевченко}$	0,97	0,93	0,93	27,7 м³/с	256 м³/с
Уровень воды в Атырау (H, м БС	$X_1 = Q_{Махамбет}$; $X_2 = H_{Форт\text{-}Шевченко}$	0,79	0,63	0,62	0,37м	-27,26 мБС

По полученным данным множественной корреляции $Q_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$ расход воды в пос.Махамбет расположенный в 145 км от устья реки Урал и уровни воды у Каспийского моря на посту Форт-Шевченко имеет очень высокую корреляцию между набором предикторов и фактическими расходами на посту г.Атырау расположенному в 27 км от устья (множественный R = 0,97). Фактически, предсказанные значения модели очень близки к реальным по линейной связи (R^2 = 0.93). Это означает, что 93 % вариации (изменчивости) расходов на Атырау может быть объяснено моделью, то есть предикторами x_1 и x_2. Остальные 7 % вариации — это либо шум, либо факторы, которые модель не включила (например, атмосферные осадки, ветровое воздействие и т.д.). В среднем модель ошибается на ±27,7 м³/с. Чтобы понять, является ли стандартная ошибка 27,7 большой или маленькой, необходимо сравнить её с масштабом значений расхода:

- Средний расход = 256 м³/с
- Ошибка ~ 27,7 м³/с

Относительная ошибка:

$$\frac{27,7}{256}.100\% = 10,8\%$$

То есть в среднем модель ошибается ±10,8 % от среднего значения.

Исходя из выше перечисленных можно сделать выводы о том что, наблюдается сильная связь между расходом выше по течению (Махамбет) и расходом на Атырау. Уровни воды у устья (Форт-Шевченко) также вносят дополнительную информацию, то есть:

- уровень воды в Каспии может влиять на гидравлическое сопротивление, возвратные волны, или “обратное подпирание” в реку, то есть, при высоком уровне в Каспии (в устье) часть притока может “назад подпирать” реку Урал, снижая отток, или наоборот.

Результаты множественной корреляции по функции $H_{атырау}=f(Q_{махамбет},H_{форт\text{-}шевченко})$ показывает значения множественный R = 0,79. То есть было установлено, что сам уровень воды в районе Атырау имеет хорошую связь, однако те же предикторы дают менее точный результат. Стандартная ошибка 0,37 м — это малая абсолютная погрешность (~1,36% от среднего уровня).

В целом, данные расчётов подтверждают существование устойчивых гидрологических связей между верхними, средними и нижними участками реки Урал. Расход на посту Атырау можно предсказывать с высокой точностью на основе расхода в Махамбет и уровня в устье, тогда как уровень воды в Атырау — более чувствительный параметр, требующий расширения модели. Оба анализа предоставляют важную научную основу для мониторинга, моделирования и управления водными ресурсами в бассейне Урала.

В ряде случаев значительные колебания уровня воды в дельтовой системе обусловлены преимущественно гидрологическими процессами, происходящими в Каспийском море. Таким образом, выявлено, что краткосрочные и сезонные изменения уровня воды в дельте не обязательно связаны с увеличением речного стока, а могут отражать воздействие морских процессов, и не иметь связь с фоновым уровнем.

Полученные результаты подчёркивают необходимость комплексного подхода и применения корректирующих коэффициентов к оценке гидрологического режима дельты Урала с учётом как речных, так и морских факторов. Это особенно актуально в условиях общей неустойчивости уровня Каспийского моря, а также при разработке мер по адаптации водохозяйственной и экологической инфраструктуры региона.

4. Обсуждение

Полученные результаты показывают, что гидрологические процессы в дельтовой части реки Жайык формируются под одновременным влиянием речного стока и уровня Каспийского моря. Анализ корреляционных связей подтвердил, что расход в верхнем створах (Махамбет) играет ключевую роль в формировании расходов на участке Атырау, что отражает преобладающий вклад речного притока. Однако добавление морского фактора — уровня воды в районе Форт-Шевченко — влияет на динамику, указывая на наличие подпорных эффектов.

Множественная корреляция для зависимости QАтырау = f(QМахамбет, НФорт-Шевченко) демонстрирует высокое значение множественного R (0,79), что подтверждает устойчивость гидравлической связи между участками реки и устьевой зоной. При этом относительно низкая объяснённая доля дисперсии для уровня воды в Атырау подчёркивает сложность и многокомпонентность процессов, влияющих на формирование уровня. В отличие от расхода, уровень реагирует на локальные условия русла, ветровые явления, неоднородные глубины, изменения гидравлического сопротивления и кратковременные подпорные волны, что объясняет меньшую точность моделей.

Особое значение имеет установление факта, что повышение уровня воды в дельте может происходить без увеличения речного стока. Такое явление связано с обратным подпором, возникающим при высоких уровнях Каспия. Подпорное воздействие изменяет градиент уровней вдоль нижнего течения, снижает скорость оттока и может создавать впечатление «водности», не соответствующей реальному объёму притока. Это приводит к существенным искажением в интерпретации гидрологических данных, если морской фактор не учитывается.

В совокупности эти результаты демонстрируют необходимость пересмотра традиционных подходов к оценке водности и уровня воды в дельте Жайыка. Доступные данные подтверждают, что сезонные и краткосрочные колебания уровня в дельтовой зоне не всегда являются следствием процессов в речном бассейне, а могут полностью определяться внешними морскими воздействиями. Это делает обязательным использование комплексных моделей, объединяющих речной и морской компоненты.

5. Заключение

Проведённое исследование показало, что динамика гидрологического режима дельты реки Жайык определяется сочетанием речных и морских процессов. Высокая корреляция между расходами в Махамбет и Атырау подтверждает стабильность речной связи между верхними и средними участками реки. Вместе с тем значимое влияние уровня Каспийского моря указывает, что морской подпор выступает важным фактором, изменяющим условия стока в нижнем течении.

Установлено, что повышение уровня воды в дельтовой части может происходить без увеличения стока — исключительно за счёт подпорного воздействия высоких уровней Каспийского моря. Это объясняет наличие ситуаций, когда наблюдаемые уровни в Атырау и в дельтовой системе не связаны с реальной водностью реки. Таким образом, классические расчёты, основанные только на речных параметрах, оказываются недостаточными для корректной оценки гидрологического режима.

Полученные результаты подчёркивают необходимость внедрения комплексных методов анализа, учитывающих динамику Каспия, а также разработки корректирующих коэффициентов для гидрологических моделей дельты Урала. Это особенно важно в условиях нестабильного уровня моря, что представляет прямой интерес для водного хозяйства, экологического мониторинга и планирования адаптационных мероприятий в регионе.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Для исследовательских статей с несколькими авторами необходимо предоставить короткий параграф, указывающий их вклад. Должны быть использованы следующие утверждения: «Концептуализация, X.X. и Y.Y.; методология, X.X.; программное обеспечение, X.X.; валидация, X.X., Y.Y. и Z.Z.; формальный анализ, X.X.; исследование, X.X.; ресурсы, X.X.; курирование данных, X.X.; написание — подготовка оригинального черновика, X.X.; написание — рецензирование и редактирование, X.X.; визуализация, X.X.; руководство, X.X.;

администрирование проекта, X.X; получение финансирования, Y.Y. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи». Авторство должно быть ограничено теми, кто внес существенный вклад в представленную работу.

8. Информация об авторе

Данная информация должна быть предоставлена для всех авторов в следующем виде:
Ахметов Серик Кабуалиевич – Председатель правления, НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; serik.akhmetovkz@gmail.com

9. Финансирование: Пожалуйста, добавьте: «Нет внешнего финансирования» или «Это исследование финансировалось ФОНДом (Название), номер гранта XXX».

10. Благодарности: Вы можете выразить признательность за любую поддержку, не включенную в разделы вклада или финансирования автора в этом разделе. Это может включать административную и техническую помощь.

11. Конфликты интересов: Авторы должны заявить о любых конфликтах интересов или заявить: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Это включает личные обстоятельства или интересы, которые могут ненадлежащим образом повлиять на результаты исследования. Это должно быть раскрыто, если спонсоры были вовлечены в разработку исследования, сбор данных, анализ, написание рукописи или решения о публикации. Если они не были вовлечены, заявите: «Финансисты не играли никакой роли в разработке исследования, сборе данных, анализе, написании рукописи или решениях о публикации».

12. Список литературы

Список литературы

1. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (ЕДС). Казгидромет. https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/gosudarstvennyy-vodnyy-kadastr-poverhnostnye-vody
2. Базарбай, Л. Б., Елтай, А. Г., Жагпарова, Н. Н., Шишкина, Г. М. Влияние реки Жайык на уровень Каспийского моря. Гидрометеорология и экология, № 4, 2024, с. 7–14.
3. Ивкина, Н. И., Терехов, А. Г., Наурозбаева, Ж. К. Колебания уровня Каспийского моря и диагностика изменений береговой линии (2005–2015) с помощью спутниковых данных LANDSAT. Гидрометеорология и экология, 2015 (переиздание / переоценка).
4. Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D. Long-term Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, 2017, Vol. 44.
5. Lahijani, H. A. K., et al. Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and coastal wetlands. Science of The Total Environment, 2023.
6. Mikhailov, V. N. Hydrological and morphological processes at river mouths of the Caspian Sea. Journal of Water Resources, 2014.
7. Kenzhegaliev, A., et al. Fluctuation in the Level of the Caspian Sea and its Consequences. E3S Web of Conferences, SUSE-2021, Article 01064, 2021.
8. Scarelli, F. M., et al. Natural and anthropogenic influences on depositional processes in the Ural Delta system. Marine Geology, 2017.
9. Bezrodnykh, Y., et al. The Northern Caspian Sea: Consequences of climate-driven water balance changes. Quaternary International, 2020.
10. Akbari, M., et al. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in climate and river regimes. Environmental Research Letters, 2020.

11. Ивкина, Н. И., Елтай, А. Г., Клове, Б., Садуокасова, М. Т., Шенбергер, И. В., Шишкина, Г. М. Колебания уровня и их влияние на нефтяное загрязнение в казахстанском секторе Каспия. Гидрометеорология и экология, 2020.
12. Arystambekova, D., et al. Assessment of Changes in the Maximum Flow of the Zhayyk (Ural) River. Journal of Ecological Engineering, 2019.
13. Rychagov, G. I. (цит. в обзоре) Палеогеография и климат Каспийского моря. Вклад в историческую динамику уровня. (пересмотр в современной литературе)
14. Naderi Beni, A., et al. Caspian Sea level changes during the last millennium. Climate of the Past, 2013.

Мақаланың аты

Аты Тегі, Аты Тегі және Аты Тегі

Аңдатпа: Зерттеу мақалаларына арналған аңдатпа 300 сөзден аспайтын абзац ішінде зерттеуді қысқаша мазмұндауы керек. Авторларға арнайы тақырыптарды пайдаланбай құрылымдық форматты қабылдау ұсынылады. Аңдатпа мақаланың мазмұнын объективті түрде көрсетуі керек және негізгі мәтінде талқыланбаған немесе қолдалмаған нәтижелерді қамтымауы керек. Сонымен қатар, ол негізгі қорытындыларды асыра айтудан аулақ болу керек.

Түйін сөздер: түйін сөз 1; түйін сөз 2; түйін сөз 3 (мақалаға тән, бірақ пәндік пәнде жеткілікті түрде кең таралған 3-10 түйін сөзді тізімдеңіз)

Следующая информация должна быть предоставлена на английском языке.

Title

Firstname Lastname, Firstname Lastname and Firstname Lastname

Abstract: An abstract for research articles should concisely summarise the study within a paragraph of no more than 300 words. Authors are encouraged to adopt a structured format without using specific headings. The abstract must objectively reflect the article's content and should not include results not discussed or supported in the main text. Additionally, it should avoid overstating the main conclusions.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3 (List three to ten pertinent keywords specific to the article yet reasonably common within the subject discipline)